Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum-Jubiläum
GROSSES PREISRÄTSEL
Ihre Chance auf tolle Gewinne

Spektrum DER WISSENSCHAFT
10/08
OKTOBER 2008

UMWELT
Späte Rettung für den Aralsee?

ASTROBIOLOGIE
Fotosynthese unter fremden Sternen

MEDIZIN
Nachwachsende Gliedmaßen beim Menschen?

Jenseits der grauen Zellen

Weiße Substanz: die verkannte Hälfte unseres Gehirns

MIT SONDERTEIL
spektrumdirekt
DIE WOCHE

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E
10
4 194058 407402

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Über Geschmack lässt sich streiten

Eigentlich sollte man über Geschmack besser nicht streiten, denn bekanntlich liegt Schönheit »im Auge des Betrachters«. Was aber unser Essen angeht, sollte man vielleicht Ausnahmen zulassen. Denn beispielsweise kann sich kaum einer der Wirkung des klassischen Geschmacksverstärkers Glutamat entziehen, der schon 1908 von Kikunae Ikeda entdeckt wurde. Was den Japaner damals interessierte: woher der Wohlgeschmack von Fleisch, Käse oder Tomaten kommt, der sich eben nicht durch die üblichen Geschmacksrichtungen süß, sauer, salzig oder bitter beschreiben ließ. Dank Ikeda war eine neue – wenn auch noch immer umstrittene – fünfte Geschmacksqualität geboren: umami. Heute ist Glutamat in vielen Lebensmitteln und in fast jeder Küche eine Standardzutat.

Doch damit endet die Erfindung neuer Geschmacksverstärker noch lange nicht. Denn wer seine Nahrung noch süßer oder salziger schmeckt, könnte ja weniger davon essen – und vielleicht sogar abnehmen. Das jedenfalls ist die Hoffnung mancher Lebensmittelchemiker, die so ihren Beitrag gegen die Übergewichtsplage leisten wollen. Ob das klappen wird, darüber lässt sich trefflich streiten; auch, ob man noch mehr Zusatzstoffe im Essen haben möchte. Aber jenseits der bekannten fünf Geschmäcker entwickeln Forscher längst weitere künstlich modulierte Geschmackserlebnisse. Wenn Sie mehr darüber wissen wollen, warum Ihr kalorienarmes Essen demnächst auch noch »sahnig«, »kühl«, »bittergehemmt« oder »kremig« schmecken könnte, dann lesen Sie weiter auf S. 58.

Im August wurden in München einem 54-jährigen Landwirt in einer sensationellen Operation beide Arme eines Toten angenäht – eine medizinische Ersttat. In den nächsten zwei Jahren muss sich nun zeigen, ob die Arme auch voll funktionsfähig werden. Trotzdem: Wäre es nicht viel besser, man könnte Finger, Hände, Füße oder eben auch Arme einfach nachwachsen lassen? Vermutlich hat sich jeder, der in der Schule die Tierwelt durchexerziert hat, über die phänomenale Fähigkeit mancher Tiere zur Regeneration ihrer Gliedmaßen gewundert. Bei der Eidechse der abgebrochene Schwanz, beim Wurm manchmal fast der ganze Körper. Beim Axolotl, einem Molch, wachsen bei Verlust nicht nur Gliedmaßen, sondern sogar Teile von Herz und Gehirn wieder nach – und zwar narbenlos, vollständig und funktionstüchtig. Und bei Planarien, einer Gruppe der Strudelwürmer, kann selbst aus einem kleinen Wurmstück noch ein ganzes Tier wieder erstehen.

Preisfrage: Warum klappt das beim Menschen nicht? Richtig, ein bisschen was geht immer, kleinere Hautwunden heilen relativ schnell. Aber von Fähigkeiten wie bei den genannten Tieren ist auch die regenerative Humanmedizin noch meilenweit entfernt. Immerhin: Eine gekappte Fingerkuppe kann nachwachsen. Trotzdem ist der Fortschritt auch hier ein Eichhörnchen – ein bis zwei Jahrzehnte, so schätzen unsere Autoren, kann es schon noch dauern, bis wir menschliche Organe und Gliedmaßen regenerieren können (S. 50).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

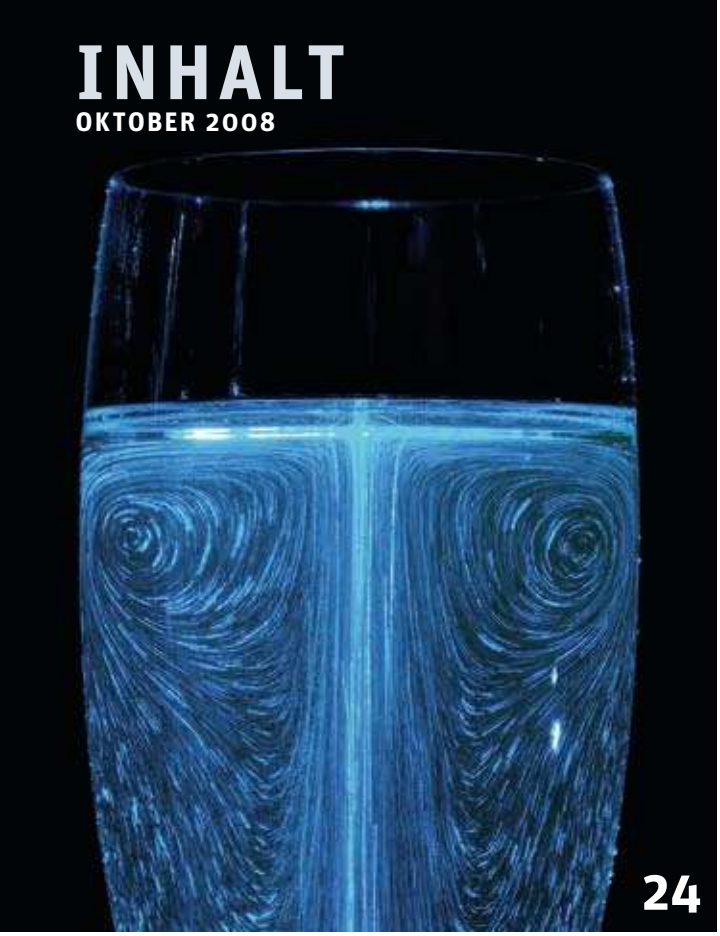
Neues aus unserem Hause

spektrumdirekt DIE WOCHE

Eine Wochenzeitung zur Wissenschaft?

Das gab es im deutschsprachigen Raum bislang nicht. Die Kollegen unserer Internetzeitung spektrumdirekt aber bieten jetzt genau dies an: Das Wichtigste der Woche als PDF-Datei! Eine Beispielausgabe finden Sie im Mittelteil dieses Hefts oder unter www.spektrumdirekt.de/info.

INHALT
OKTOBER 2008



ASTRONOMIE & PHYSIK
Perlenwirbel im Sektglas

MEDIZIN & BIOLOGIE
Fernziel: eine amputierte Hand nachwachsen lassen

ASTRONOMIE & PHYSIK
Könnte so die Flora außerirdischer Welten aussehen?

AKTUELL

10 Spektrogramm
Trinkfeste Spitzhörnchen · Zuckerkrank trotz Vollkornkost · Phönix »schmeckt« Eis · Zugvogel in der Klimafalle · Massereichster Urzeit-Galaxienhaufen u. a.

13 Bild des Monats
Stellares Familienporträt

14 Der doppelgesichtige Mars 🔊
Entstand das nördliche Tiefland beim Einschlag eines riesigen Asteroiden?

16 Laserblitze im Rekordtakt 🔊
Neuer Ultrakurzpulslaser hilft beim Aufspüren erdähnlicher Exoplaneten

20 Die Stunde der Schmarotzer 🔊
Parasiten können bis zu 40 Prozent der Masse von Meeresschnecken ausmachen

21 Verbindung auf Probe 🔊
Erst bei genügend Informationsfluss werden vorläufige Nervenkontakte zu dauerhaften Synapsen

22 Springers Einwürfe
Kilometerlange Quantenobjekte

ASTRONOMIE & PHYSIK

24 Sturm im Champagnerglas
Sichtbar gemachte Flüssigkeitswirbel zeigen: Wahrer Genuss ist auch eine Frage der Physik. Zwei Forscher auf der Suche nach dem optimalen Schaumweinglas

30 ▶ Pflanzenfarben auf fremden Planeten
Auf den meisten Exoplaneten würden wir wohl vergeblich nach grüner Flora suchen; denn rote, blaue oder gar schwarze Vegetation könnte das Licht anderer Sonnen oft besser nutzen

Titelmotiv: Skulptur von Margie McDonald, fotografiert von Frank Ross

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter:
www.spektrum.de/audio

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITEL

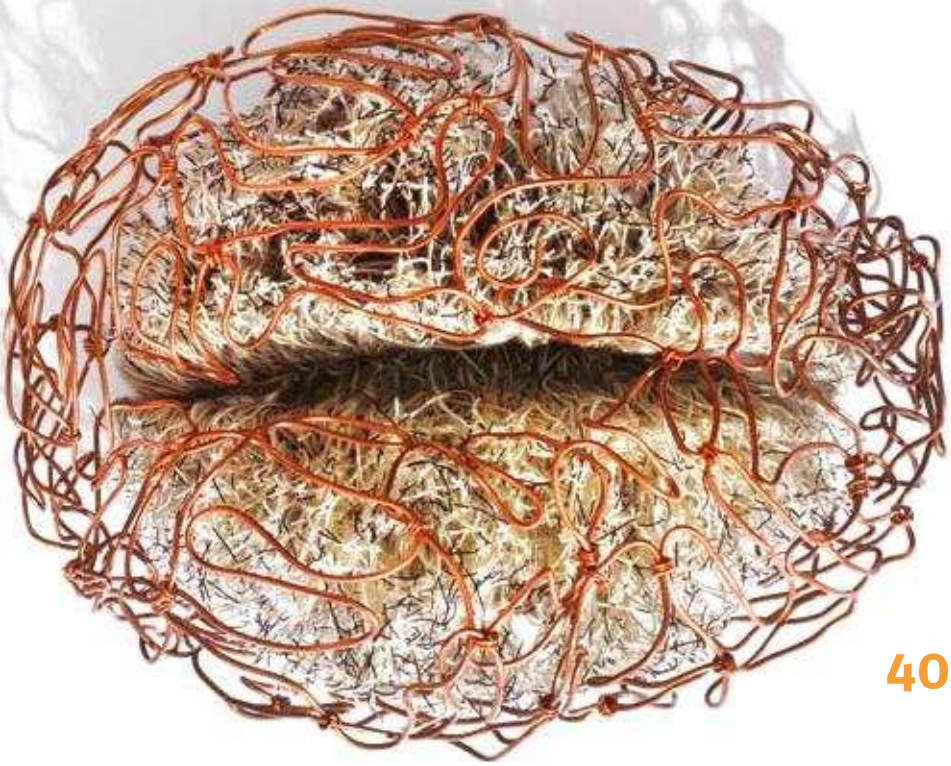
40 Unterschätzte weiße Substanz
Die weiße Hirnmasse kann mehr als gedacht. Zum Beispiel hilft sie beim Lernen. Umgekehrt können Defekte geistige Störungen bedingen 🔊

50 ▶ Regeneration menschlicher Extremitäten?
Nicht unmöglich – meinen Forscher angesichts der bisherigen Erkenntnisfortschritte. In vielleicht zwanzig Jahren könnte es so weit sein

58 Super-Geschmacksverstärker 🔊
Sie könnten zu gesünderer Ernährung verhelfen, indem sie nahrhafte Kost vorgaukeln, die in Wahrheit nur wenig Zucker, Salz oder anderes enthält, was dick macht und in Mengen ungesund ist

TITELTHEMA

Weiße Substanz unerwartet bedeutsam



40

64

ERDE & UMWELT
Das Schicksal des Aralsees

90

TECHNIK & COMPUTER
Mehr Sicherheit im Verkehr

ERDE & UMWELT

64 ▶ **Ist der Aralsee noch zu retten?**
Der einst viergrößte See der Welt ist durch rücksichtslose Wasserentnahme aus seinen Zuflüssen auf ein Zehntel seines früheren Volumens geschrumpft. Doch Restaurierungspläne existieren und wurden teils erfolgreich umgesetzt

MENSCH & GEIST

SERIE (TEIL II)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

74 **Komplexität**
Mit Briefmarken in vorgegebener Stückelung lässt sich – ab einer bestimmten Schwelle – jedes Porto darstellen. Wo liegt diese Schwelle? Diese Frage führt auf eines der tiefsten Rätsel der modernen Mathematik

80 **Sortierproblem**
Wie kann man Pfannkuchen nach ihrer Größe mit kleinstem Aufwand sortieren? Wie lässt sich aus den Genunterschieden zweier Arten abschätzen, wie lang sie schon in der Evolution getrennt sind?

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

88 **Schön cool bleiben**
Ein steter Kreislauf aus Verdampfen und Verflüssigen eines Kältemittels hält Lebensmittel im Kühlschrank frisch

90 **Riskanter als nötig**
Schwere Autos gelten als besonders sicher. Zu Unrecht, sagen Forscher. Die Schwergewichte bergen nicht nur für den Unfallgegner ein hohes Risiko

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial
8 Leserbriefe
8 Impressum
72 Im Rückblick
102 Rezensionen:
Elisabeth Hamel *Das Werden der Völker in Europa*
David Rothenberg *Warum Vögel singen*
Julia Friedrichs *Gestatten: Elite*
David Foster Wallace *Georg Cantor*
112 ▶ Preisrätsel
114 Vorschau

Nach S. 100 finden Sie eine **Ausgabe der neuen Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt – Die Woche«**, die ab sofort Premium-Abonnenten von spektrumdirekt als PDF-Datei zur Verfügung steht

spektrumdirekt
DIE WOCHE

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf **www.spektrum.de**. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

HENNING MANNINGA / FOTOLIA

TIPPS »Nachricht aus Borneo«
www.spektrumdirekt.de/borneo

TIPPS *Das* Wissenschaftsportal im Netz
www.wissenschaft-online.de

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Wenn der Planet heißer wird

Das Klima ändert sich, und immer öfter werden die Folgen sichtbar. Finden Sie hier aktuelle Nachrichten zum Klimawandel, zum Beispiel über zunehmend stärkere Wirbelstürme, die Verlierer der Erderwärmung und die Anstrengungen, dem Kohlendioxid in der Atmosphäre Herr zu werden

www.spektrumdirekt.de/klima

Wie wir Neues zu Wissen verarbeiten

Wer Kindern hilft, Erfahrungen zu sammeln, kann nur staunen über die rasante Geschwindigkeit, mit der sie sich Neues zu eigen machen. Aber auch das erwachsene Gehirn ruht nicht. Was finden Forscher über das Lernen heraus?

www.spektrumdirekt.de/lernen

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

»Nachricht aus Borneo«

Freud und Leid einer Wissenschaftlerin in den Regenwäldern einer tropischen Urwaldinsel: Sara Leonhardt, Insektenforscherin aus Würzburg, betreibt in diesen Monaten Feldforschung für ihre Dissertation und schießt Bilder für ihr Reisetagebuch

www.spektrumdirekt.de/borneo

Das Wissenschaftsportal im Netz

Auf wissenschaft-online.de haben Sie nun den Überblick: aktuelle Nachrichten aus allen naturwissenschaftlichen Disziplinen sowie aus Psychologie und Technik, dazu Rezensionen und Blogs, Fachwörterbücher und Lexika. Starten Sie hier Ihre wissenschaftliche Forschungsreise durchs Internet:

www.wissenschaft-online.de

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Spekulieren? Aber mit Ansage!

Rund 200 Leser stimmten bei unserer Umfrage ab. Weit reichende physikalische und kosmologische Modelle, die sich noch nicht experimentell überprüfen lassen – wissenschaftlicher Nonsens oder ein richtiger Weg?

www.spektrum.de/artikel/966630

In Kindern Lust aufs Grün wecken

Manche kennen weder Drossel noch Butterblume, Kühe sind lila, und das Essen kommt aus dem Supermarkt. Abhilfe scheint möglich: Susanne Hufmann über »Natur entdecken mit Kindern« für kleine Entdecker und die ganze Familie. Lesen Sie die Rezension oder schreiben Sie selbst über das Buch:

www.spektrumdirekt.de/artikel/966031

YORICK LIEFTING / FOTOLIA

FÜR ABONNENTEN »Schluss mit lustig?!«

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Supernova ›in flagranti‹ erwischt«

www.astronomie-heute.de/artikel/966877

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Schluss mit lustig?!«

Nicht schon wieder! Um der Langeweile lästiger Routinen zu entfliehen, müssen Sie nicht die Umstände ändern, sagen Forscher. Alles, was Sie dazu brauchen, ist die richtige Geisteshaltung – voll konzentriert im Hier und Jetzt

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Weltraum** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen*

»Kosmetik für graue Zellen«

Nicht nur Sportler dopen. Auch Militärs, Studenten und selbst Professoren tun es: Sie steigern ihre geistige Leistungsfähigkeit mit Neuroenhancern. Wie wirken die Präparate? Und droht uns schon bald eine »schöne neue Welt« der Lifestyle-Psychopharmaka?

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/966321

»Supernova ›in flagranti‹ erwischt«

Während der routinemäßigen Nachbeobachtung einer Supernova in einer nahen Galaxie explodierte im Gesichtsfeld des Röntgensatelliten SWIFT eine zweite. Der Glückstreffer ermöglichte es Astronomen erstmals, einen Sternkollaps von Anfang an zu untersuchen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/966877

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Direkt zu den Leckerbissen

In neuem Layout präsentieren sich seit Kurzem die »Tagebücher der Wissenschaft«. Aktuelle Blogposts aus allen Disziplinen und die neuesten Kommentare sind jetzt direkt auf www.scilogs.de zu finden, ein regelmäßiger »Blogwatch« pickt zudem einige Leckerbissen heraus. Hier lesen Sie, was die Wissenschaftswelt bewegt – ob das Klima oder der Umweltwandel, der neue europäische Teilchenbeschleuniger LHC oder die Erforschung des Kosmos, und natürlich spannende Neuigkeiten unter den Forschungsergebnissen weltweit. Diskutieren Sie mit Wissenschaftlern, Journalisten und Lesern auf

www.wissenslogs.de
www.scilogs.de

Der kosmische Ursprung des Zeitpfeils

August 2008

Annahme eines Schöpfers plausibler

Beim Lesen dieses Artikels hätte ich den Autor gerne gefragt: Woher weißt du?

Wenn ich unsere Welt betrachte, bin ich fasziniert von ihrer klaren und gerade in ihrer mathematischen Einfachheit beeindruckend schönen Ordnung. Sie lässt meine Annahme, dass die mit mathematischer Intelligenz aufgebaute Welt auf einen intelligenten Schöpfer zurückgeht (der von Mathematik sogar noch mehr versteht als menschliche Genies wie zum Beispiel Pythagoras und Gauß), sehr viel plausibler erscheinen als die Spekulationen Carrolls über die vermeintliche Vorgeschichte unseres Universums. Beweisbar beziehungsweise falsifizierbar im Sinne Poppers sind weder die Annahme eines Schöpfers noch die Spekulationen Carrolls. Erstere erfordert meines Erachtens aber sehr viel weniger Glaubenskraft, sehr viel weniger »credo, quia absurdum« – »Ich glaube, weil es absurd ist« als der Aufsatz Carrolls.

Reiner Vogels, Swisttal

Entropie des beobachtbaren Kosmos

S. M. Carroll möchte Aussagen über den Zeitpfeil machen und bedient sich hierzu an zentraler Stelle seines Artikels des Begriffs der Entropie. Dieser Begriff ist für die Thermodynamik geschaffen, und in diesem Rahmen wird er sehr erfolgreich verwendet, auch für technische Entwicklungen. Er ist verknüpft mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der da lautet: Im abgeschlossenen System nimmt die Entropie stets zu.

Ich kann mir nichts vorstellen unter der Entropie des beobachtbaren Kosmos, der jedenfalls nur ein kleiner Teil des »gesamten« Kosmos sein kann. Denn dieser Teil ist ja nicht konstant. Auch jetzt, in diesem Moment, verschwindet jede Sekunde irgendwelche Materie hinter dem kosmischen Horizont. Da kann von einem »abgeschlossenen System« nicht die Rede sein.

Dr. Hans-Joachim Stortnik, Kirchdorf am Inn

Es handelt sich um pure Metaphysik

Meines Erachtens fehlt in allen Artikeln, die sich mit Themen wie Multiuniversen beschäftigen, der Hinweis, dass es sich hier um pure Metaphysik handelt. So können auch die Autoren dieses Artikels kein Experiment anbieten, das die These des »lokalen beobachtbaren Universums in einer Flut von Multiuniversen« falsifizieren kann, da dies ja auch prinzipiell nicht möglich ist. Wie soll man denn etwas falsifizieren, was sich schon definitionsgemäß jeglicher Beobachtung entzieht?

Man sollte kritisch gegenüber Artikeln bleiben, die zu viel spekulativen Überbau als harte Naturwissenschaft verkaufen.

Ich persönlich halte es in solchen Fragen nach den letzten Ursachen des Universums mit dem Philosophen Wittgenstein: »Die Lösung des Rätsels des Lebens in Raum und Zeit liegt außerhalb von Raum und Zeit.«

Christian Lamprecht, Bamberg

KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

In unserem Universum verläuft die Zeit vom hoch- zum immer weniger geordneten Zustand. Ist es umgekehrt in anderen Teilen eines hypothetischen Universums?

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Andrea Kamphuis, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke, Michael Scherer, Claus-Peter Sesín, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01. 01. 2008.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, Vice President: Mike Florek, Circulation Director: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Behandlung nur mit adulten Stammzellen

Stammzellen, Politik und Pluralität: Wer hat in diesem Land die Moral gepachtet? Juni 2008

Bei ethischen Fragen der Stammzellforschung muss immer wieder zwischen embryonalen und adulten Stammzellen unterschieden werden.

▶ Embryonale Stammzellen werden noch aus Embryonen gewonnen; die Hoffnung vieler Forscher liegt auf den Möglichkeiten der Reprogrammierung zum Beispiel von Hautzellen in embryonale Stammzellen. Es gibt aber bis heute keine Therapie, die einsetzbar ist.

▶ Adulte Stammzellen, die im Nabelschnurblut, in der Nabelschnur und in der Plazenta vorkommen, können einfach und ethisch unproblematisch gewonnen werden.

Mit adulten Stammzellen wurden schon tausende Patienten weltweit therapiert. Man unterscheidet zwischen Allogenen Stammzellgaben (von Spendern) und Autologen (eigene Zellen). Im Fettgewebe, im Knochenmark und an vielen anderen Organen sind adulte Stammzellen zu gewinnen. Mehr als 80 Krankheiten werden mit adulten Stammzellen erfolgreich behandelt.

Dr. med. Christoph Kösters, Aachen

Effekte endokriner Disruptoren

Der Östrogen-Blues
Forschung aktuell, Juli 2008

Der Beitrag belegt, dass endokrine Disruptoren wie Phthalate die Entwicklung der Vögel beeinflussen. Von besonderem Interesse ist, ob auch der Mensch betroffen ist. In einer bemerkenswerten Studie untersuchte die Arbeitsgruppe von Shanna Swan an der University of Rochester (New York) den Einfluss von Phthalaten auf die Ausbildung des sexuellen männlichen Phänotyps. Anlass für diese Untersuchung war der Befund, dass hohe Dosen bestimmter Phthalate bei Ratten unter anderem zu einer Verkürzung der anogenitalen Distanz (AGD) führten. Die AGD ist ein empfindlicher Marker für die androgenabhängige Entwicklung der Reproduktionsorgane von männlichen Föten. In der Studie von Swan et al. wurden bei schwangeren Frauen mit männlichem Fötus während der Spätschwangerschaft Phthalatmetabolite im Urin untersucht. Nach der Geburt zeigte sich bei diesen Jungen, dass die AGD unter Phthalatexposition signifikant kürzer war. Zusätzlich wurde gehäuft ein Hodenhochstand und ein kleineres Genitale beobachtet. Dabei ist zu bedenken, dass die Konzentrationen der Phthalatmetabolite zwar hohe, aber durchaus übliche Werte aufwiesen, wie sie bei etwa 25 Prozent der US-Bevölkerung zu finden sind. Man muss diese möglichen Effekte endokriner Disruptoren beim Menschen sehr genau verfolgen, um rechtzeitig präventive Maßnahmen zu ergreifen.

Prof. Dietrich Klingmüller, Bonn

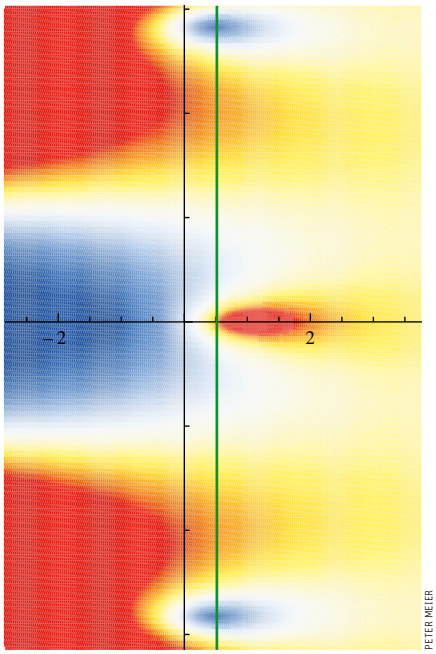
Errata:

Ultrakurze Lichtblitze
Spektrogramm, August 2008

Die oszillierenden Elektronen senden kurze Blitze im extremen Ultraviolettbereich – drei pro Infrarotlaserpuls, nicht drei pro Infrarotphoton, wie fälschlicherweise geschrieben.

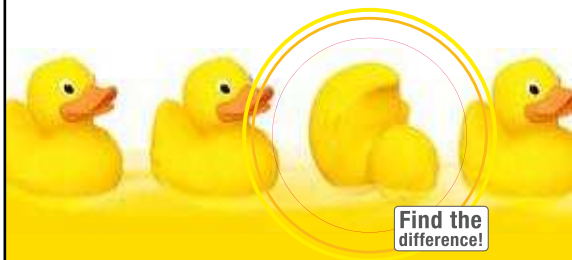
Riemannsche Vermutung
September 2008

In der Abbildung auf S. 87 ist leider die grün eingezeichnete kritische Gerade im Produktionsprozess verloren gegangen. Nachfolgend ein Ausschnitt der korrekten Version.



PETER MEIER

Mitten im Markt Messe Stuttgart



VISION 2008

21. Internationale Fachmesse für industrielle Bildverarbeitung und Identifikationstechnologien

Neue Messe Stuttgart
4.- 6. November 2008

Auftrieb für Ihren Wettbewerbsvorteil.

Mehr Qualität, höhere Prozessgeschwindigkeit, geringere Kosten – ehrgeizige Ziele, für die es eine einfache Lösung gibt: Industrielle Bildverarbeitung. Die neuen Systeme und Komponenten sind flexible Prozessbeschleuniger und überzeugen durch kurze Amortisationszeiten. Immer mehr Branchen setzen daher auf die IBV. Wie Sie Ihre Prozesse mit IBV optimieren können, entdecken Sie auf der Weltleitmesse VISION 2008. Mit rund 300 Ausstellern, einem dicken Rahmenprogramm und vielen Experten aus Wissenschaft und Praxis.

www.vision-messe.de

PSYCHOLOGIE

Schon Babys denken in Kategorien

WILL KIRK, HOMEWOOD IMAGING AND PHOTOGRAPHIC SERVICES (HIPS), JHU

Weiß die 14 Monate alte Libby noch, wie viele Objekte die Versuchsleiterin im Kasten versteckt hat, und sucht danach, indem sie die Hand durch die Öffnung steckt?

■ Das Arbeitsgedächtnis ist begrenzt: Nur drei bis vier Dinge kann ein Erwachsener gleichzeitig bewusst im Kopf behalten. Deshalb unterteilen wir größere Informationsmengen in Gruppen, die sich jeweils als einzelne Einheit merken lassen. Zum Beispiel können wir uns die Buchstabenfolge ARDRTLZDF leicht über die sie aufbauenden Namen von Fernsehsendern einprägen. Lisa Feigenson und Justin Halberda von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) stellten jetzt fest, dass auch Säuglinge diesen Trick schon beherrschen.

Sie präsentierten den zwischen zehn und zwanzig Monate alten Kindern vier Objekte, die entweder aus einer einzigen oder zwei unterschiedlichen Kategorien (zum Beispiel Tierfiguren und Spielzeugautos) stammten. Anschließend versteckten sie die Gegenstände in einem Kasten, wobei sie manchmal heimlich einige entfernten. Die Kinder durften dann durch eine Öffnung mit der Hand in die verschlossene Kiste greifen und die Spielsachen einzeln wieder herausholen. Da sie sich nur drei Dinge gleichzeitig merken können, fiel ihnen das Fehlen eines vierten Gegenstands nicht weiter auf, wenn die Objekte alle vom gleichen Typ waren. Gehörten sie dagegen zu zwei unterschiedlichen Kategorien, suchten die Kinder intensiv nach dem fehlenden Stück.

Demnach können, so die Schlussfolgerung der Forscher, schon Säuglinge Gegenstände gruppieren und dadurch die Kapazität ihres Arbeitsgedächtnisses erhöhen. Offenbar ist diese Fähigkeit angeboren und muss nicht erst erlernt werden.

PNAS, Bd. 105, S. 9926

UMWELT

Mangrovenschwund schadet Fischerei

■ Mangrovenwälder sind wichtige Ökosysteme tropischer und subtropischer Küstenregionen. Doch deren Erschließung für Landwirtschaft, Siedlungsflächen oder den Tourismus lässt sie zunehmend schrumpfen. Weltweit wurden Schätzungen zufolge schon mehr als die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Mangrovenwälder vernichtet. Bereits in 20 Jahren könnten sie völlig verschwunden sein.

Weil die Wälder in der Gezeitenzone Brut- und Futterplatz für ein Drittel der kommerziell genutzten Fischarten sind, wirkt sich ihre Zerstörung allerdings negativ auf die einheimische Fischerei aus. Eine Gruppe US-amerikanischer und mexikanischer Forscher um Octavio Aburto-Oropeza von der Scripps Institution of Oceanography in San Diego (Kalifornien) hat diesen Zusammenhang erstmals umfassend dokumentiert. Sie verglich die Fangergebnisse in 13 Küstengebieten im Nordwesten Mexikos mit den dort noch vorhandenen Mangrovenwäldern. Diese schrumpfen auch hier jährlich um etwa zwei Prozent. Die Wissenschaftler fanden eine eindeutige Beziehung: Je größer die noch intakten Wälder, desto höher die erzielten Fangmengen; wenn die salztoleranten Pflanzen mit ihren Stelzwurzeln verschwinden, dann gehen auch die Fischbestände zurück.

Mangrovenwälder haben damit große ökonomische Bedeutung. Die Forscher kommen auf einen Wert von fast 25 000 Euro pro Hektar und Jahr. Auf zehn Jahre hochgerechnet, ergibt sich mehr als das 300-Fache der von der mexikanischen Regierung genannten offiziellen Zahl.

PNAS, Bd. 105, S. 10456

OCTAVIO ABURTO-OROPEZA, UCSD

Wälder der Roten Mangrove säumen die Küste bei Santispac in der Bahía Concepción (Mexiko).

GESUNDHEIT

Zuckerkrank trotz Vollkornkost

■ Beim Diabetes vom Typ 2 büßt Insulin seine Wirkung ein, weil der Körper eine Resistenz dagegen entwickelt. Ein Ergebnis von Ernährungsstudien lautete bisher, dass der Verzehr ballaststoffreicher Nahrung das Risiko für diese Form der Zuckerkrankheit senkt. Einer neuen epidemiologischen Untersuchung von Wissenschaftlern am Deutschen Institut für Ernährungsforschung in Potsdam zufolge gilt das jedoch nicht generell, sondern trifft nur für Menschen zu, die ohnehin weniger anfällig für das Leiden sind. Bei ihnen vermindert bereits eine Scheibe Vollkornbrot am Tag das Risiko einer Erkrankung um immerhin 14 Prozent.

Pech haben jedoch Personen, bei denen ein Gen namens *TCF7L2* verändert ist. Es handelt sich um eine Punktmutation, bei der an einer Stelle der DNA-Baustein Thymin statt Cytosin auftritt. Sie macht ihre Träger, wie Mediziner seit Längerem wissen, anfälliger für Diabetes vom Typ 2, weil die Insulinausschüttung verringert ist. Die neue Studie ergab nun, dass ausgerechnet bei solchen Risikopersonen eine ballaststoffreiche Ernährung keinen positiven Effekt hat.

TECHNIK

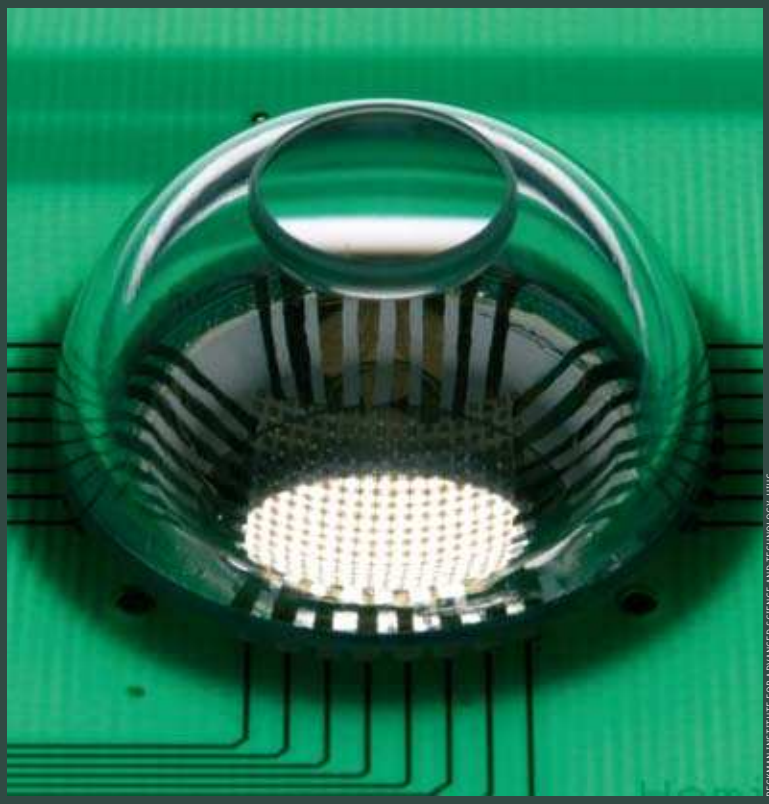
Kamera ahmt Auge nach

Sensorchips in digitalen Kameras können inzwischen Bilder mit bis zu 50 Millionen Pixeln aufnehmen. Doch sie haben einen gravierenden Nachteil: Sie sind flach. Selbst mit komplexen Optiken lassen sich die dadurch vor allem am Rand entstehenden Bildverzerrungen nur teilweise ausgleichen. US-Forscher haben jetzt eine Anordnung von Fotosensoren entwickelt, mit der sie dieses Problem umgehen. Ihr Chip ist gewölbt wie die Netzhaut des menschlichen Auges.

Lichtempfindliche Sensoren auf gekrümmte Oberflächen aufzubringen versuchen Wissenschaftler seit 20 Jahren, jedoch ohne Erfolg – die spröden Halbleiterbauteile brechen zu leicht, wenn man sie verbiegt. Yonggang Huang von der Northwestern University in Chicago und John A. Rogers von der University of Illinois in Urbana-Champaign verwendeten daher sehr kleine Sensoren mit etwa hundert Mikrometer Durchmesser. Diese platzierten sie auf einer Halbkugel aus einem Elastomer, die sie zuvor mechanisch flach gezogen hatten. Verbunden sind die Bauteile durch dünne Metalldrähte auf Kunststoffbrücken. Springt die Gummiunterlage in die Halbkugelform zurück, klappen die Drähte zu Bögen hoch.

Die so entstandene Sensoranordnung befestigten Huang und Rogers auf einem konkaven Träger, um einen stabilen Chip zu erhalten. Mit mehr Sensoren, hoffen sie, wird ihre nach dem Vorbild des Auges entworfene Kamera sogar dem Original Konkurrenz machen können.

Nature, Bd. 454, S. 748



BECKMAN INSTITUTE FOR ADVANCED SCIENCE AND TECHNOLOGY, UIUC

Die nach dem Vorbild des Auges konstruierte Kamera vermeidet mit ihrer konkaven Anordnung von Sensorchips Bildverzerrungen.

Auch wenn eine vollkornreiche Ernährung für die Diabetes-Prophylaxe nicht so allgemein wirksam ist wie gedacht, bleibt sie aber empfehlenswert. Schließlich trägt sie auch zur Vermeidung anderer Krankheiten bei – etwa im Herz-Kreislauf-Bereich.

British Journal of Nutrition, Online-Vorabveröffentlichung

BIOLOGIE

Trinkfeste Spitzhörnchen

Nach menschlichen Maßstäben gälten das Federschwanz-Spitzhörnchen *(Ptilocercus lowii)* und weitere Kleinsäuger auf Malaysia als Alkoholiker. In ihren Fellhaaren fanden Wissenschaftler um Frank Wiens von der Universität Bayreuth hohe Konzentrationen der Substanz Ethylglucuronid – ein Indiz für regelmäßigen Alkoholkonsum. Die Tiere ernähren sich großenteils vom Nektar einer bestimmten Palmenart *(Eugeissona tristis)*. Dieser enthält bis zu 3,8 Prozent Alkohol – etwa so viel wie Bier.

Die Blütenknospen von *E. tristis* verströmen einen starken alkoholischen Geruch, der attraktiv auf bestimmte Säugetiere wirkt. Der Nektar stellt für diese eine wichtige Nahrungsquelle dar. Als Gegenleistung übernehmen die Spitzhörnchen die Rolle des Bestäubers für die Pflanze, indem sie an ihrem Fell haftende Blütenpollen von Knospe zu Knospe tragen.

Die mit dem Nektar konsumierte Alkoholmenge würde bei einem Menschen, hochgerechnet auf sein Körpergewicht, zu einem Rausch führen. Nicht so bei den Spitzhörnchen: Die Forscher beobachteten sie mit Videokameras und Radiosendern, konnten aber kein Zeichen von Trunkenheit ausmachen. Anscheinend bauen die Tiere den Alkohol schnell ab.

Das Federschwanz-Spitzhörnchen ist ein enger Verwandter des letzten evolutionären Vorfahren aller lebenden Primaten. Schon seit 55 Millionen Jahren könnte es daher zu den regelmäßigen Trinkern zählen. Vielleicht ist die Schwäche für Alkohol ja auch beim Menschen ein altes stammesgeschichtliches Erbe.

PNAS, Bd. 105, S. 10426

ANNETTE ZITZMANN / UNIVERSITÄT BAYREUTH

Federschwanz-Spitzhörnchen naschen gerne alkoholhaltigen Nektar – ohne jemals einen Rausch zu bekommen.

SIMON EUGSTER

Trauerschnäpper fliegen jedes Frühjahr tausende Kilometer weit von ihren Winterquartieren in Afrika nach Europa.

ERDERWÄRMUNG

Zugvogel in der Klimafalle

■ Der Trauerschnäpper *(Ficedula hypoleuca)* überwintert wie viele andere Singvögel im tropischen Afrika und kehrt alljährlich zur Brut nach Europa zurück. Seinen Reisetermin bestimmt er anhand der Tageslänge – sie sagt ihm, wann es Zeit für den Aufbruch nach Norden ist. Weil der europäische Frühling wegen des Klimawandels aber zunehmend früher einsetzt, wodurch sich auch das saisonale Nahrungsangebot und damit das Vorkommen von Insekten für die Jungenaufzucht zeitlich nach vorne verlagert, kommen sie immer öfter zu spät.

Im Prinzip könnten sich die Vögel den veränderten Jahreszeiten in Europa anpassen, wenn sie nicht so weit im Süden überwintern würden. Das ergaben nun Versuche von Tim Coppack und seinen Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen. Die Forscher hielten junge Trauerschnäpper unter Tageslichtbedingungen, die verschiedenen geografischen Regionen zwischen Zentralafrika und Europa entsprechen. Dabei zeigte sich, dass der Zugbeginn schon bei einer Verlagerung der Winterquartiere um 1100 Kilometer nach Norden – das heißt aus den Tropen in die Sahelzone – einen ganzen Monat früher einsetzen würde.

Allerdings leidet die Region südlich der Sahara ebenfalls unter dem Klimawandel. Wegen ihrer zunehmenden Versteppung bietet sie nicht genug Nahrung für einen mehrmonatigen Aufenthalt. Die Zugvögel müssten ihr Winterquartier schon in den Mittelmeerraum verlegen; eine solch drastische Anpassung in kurzer Zeit wäre jedoch ein gewaltiger evolutionärer Sprung und ist sehr unwahrscheinlich.

Global Change Biology, Online-Vorabpublikation

PLANETOLOGIE

Phoenix »schmeckt« Eis

■ Der direkte Nachweis von Wasser auf dem Mars ist gelungen. Die NASA-Landesonde Phoenix entdeckte es in Form von Eis in einer Bodenprobe. Auch die letzten Zweifel an der Existenz von Wasser auf dem Roten Planeten sind damit ausgeräumt.

Zunächst hatte Phoenix allerdings mit Problemen zu kämpfen: Der wasserhaltige Marsboden ist so klebrig, dass sich die Probe nicht von der Schaufel des Roboters lösen und in den Analyseofen TEGA *(thermal and evolved-gas analyzer)* fallen wollte. Erst beim zweiten Anlauf gelang die Operation. Schon beim erstmaligen Erhitzen des Gemischs konnten die Forscher dann Wasserdampf nachweisen.

Es handelt sich um ein lange erwartetes Ergebnis. Schon 2001 entdeckte der Orbiter Mars Odyssey gefrorenes Wasser, indirekt von einer Umlaufbahn aus. Es liegt demnach verborgen unter der Oberfläche in den Polarregionen des Planeten – ein Grund, Phoenix genau dort abzusetzen.

Die Landesonde lieferte jetzt das letzte fehlende Beweisstück. »Zum ersten Mal haben wir Marswasser berührt und geschmeckt«, schwärmt William Boynton, Chefwissenschaftler von TEGA von der University of Arizona in Tucson. Die Forscher wollen nun herausfinden, ob das Eis fünf Zentimeter unter der Oberfläche auch schmelzen kann und eventuell Bausteine für Leben enthält.

Pressemitteilung der NASA

NASA, JPL / CALTECH / U. ARIZONA / TEXAS A&M UNIVERSITY

Beim Graben im Marsboden stieß der Roboterarm von Phoenix auf weiße Eisbrocken.

ASTRONOMIE

Massereichster Urzeit-Galaxienhaufen

■ »Wir haben tatsächlich eine Stecknadel im Heuhaufen gefunden«, sagt Georg Lamer vom Astrophysikalischen Institut Potsdam begeistert. Er und seine Kollegen sind auf den bislang massereichsten Galaxienhaufen im frühen Universum gestoßen. Das Monster verriet sich durch starke Röntgenemissionen des 100 Millionen Grad heißen Gases, das den intergalaktischen Raum im Cluster ausfüllt. Die Forscher entdeckten es mit der Nummer 2XMM J08326+524133 in dem etwa 200 000 Objekte umfassenden Katalog des Röntgensatelliten XMM Newton. Durch optische Nachbeobachtung mit dem Large Binocular Telescope in Arizona konnten sie auch die zugehörigen Galaxien aufspüren.

2XMM J08326+524133 hat die tausendfache Masse der Milchstraße und ist 7,7 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt. Damit stammt das Objekt aus einer Zeit, als das Weltall nicht einmal halb so alt war wie heute. Die Existenz eines Galaxienhaufens in einer so frühen Epoche des Universums für die Astronomen ist ein weiterer Beleg für die Dunkle Energie – jene mysteriöse Kraft, die für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich sein soll. Sie verhinderte, dass die urzeitlichen Riesen ungestört weiterwachsen konnten. Ohne diese abstoßende Kraft gäbe es heute weit größere Galaxienhaufen, als die Astronomen beobachten, erklärt Lamer.

Astronomy & Astrophysiks, Bd. 487, S. L33

ESA / ASTROPHYSIKALISCHES INSTITUT POTSDAM (AIP)

Auf einer Röntgenaufnahme des XMM-Newton-Teleskops erscheint der Galaxienhaufen 2XMM J083026+524133 als heller Fleck.

Mitarbeit: Lars Fischer und Jan Hattenbach

Stellares Familienporträt

Gleich mehrere Generationen von Sternen sind in dieser neuen Falschfarben-Infrarotaufnahme des Weltraumteleskops Spitzer versammelt. Sie zeigt einen stellaren Kreißsaal namens W5. Die neuen Sterne werden in den weißen, faserigen Gebieten geboren. Jugendliche Exemplare säumen als rosafarbene Punkte den Rand der beiden großen Hohlräume. Einige erscheinen auch an den Spitzen stalakmitenartiger Säulen. Die älteren Sterne bilden blaue Punkte im Innern der Hohlräume. Diese sind mit Staub gefüllt, der sie rot aufglühen lässt.

W5 erstreckt sich über einen Bereich, der am Himmel etwa die vierfache Fläche des Vollmonds einnimmt, und befindet sich rund 6500 Lichtjahre entfernt im Sternbild Cassiopeia. Stellare Winde von den massereichsten älteren Sternen haben deren Umgebung leergefegt. Am Rand der so geschaffenen Hohlräume verdichtete sich das weggeblasene Gas und ballte sich zu neuen Sternen zusammen. Deren Alter nimmt, wie eine genaue Analyse der Aufnahme ergab, systematisch mit dem Abstand vom Zentrum zu.

NASA, JPL / CALTECH / HARVARD-SMITHSONIAN CFA, LORI E. ALLEN UND XAVIER P. KOENIG

PLANETOLOGIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Warum der Mars zwei Gesichter hat

Neue Untersuchungen zeigen, dass das ausgedehnte Tiefland auf der Nordhalbkugel des Mars ursprünglich eine elliptische Form hatte. Computersimulationen zufolge könnte es beim Einschlag eines Asteroiden entstanden sein, der ein Drittel so groß war wie der Planet selbst.

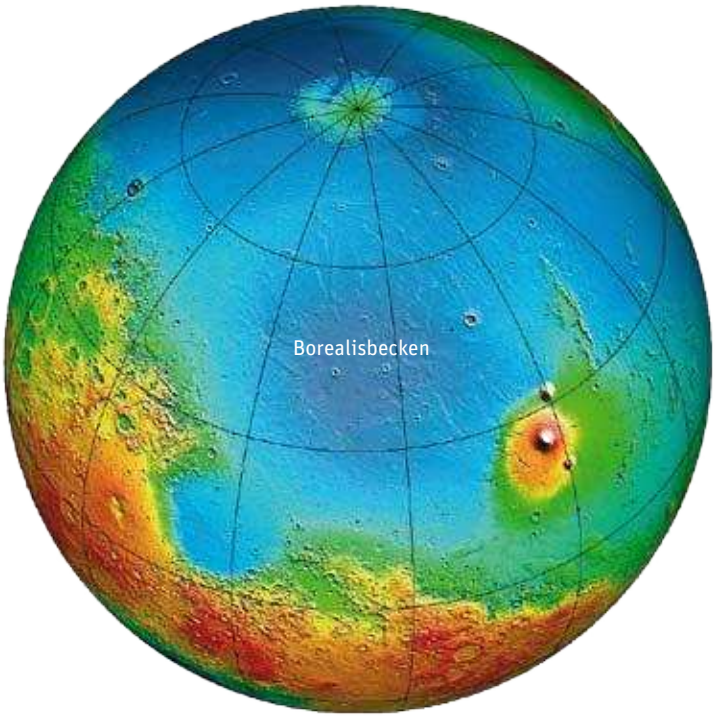
Von Jan Hattenbach

Der Mars ist äußerlich zweigeteilt: Den kraterübersäten Hochländern der Südhalbkugel, die knapp zwei Drittel seiner Oberfläche umfassen, steht im Norden eine flache, fast kraterlose Ebene gegenüber, das so genannte Borealisbecken. Diese Dichotomie stellt die Planetenforscher seit ihrer Entdeckung in den 1970er Jahren vor ein Rätsel. Entstand das Becken durch den Einschlag eines großen Himmelskörpers, etwa eines Asteroiden oder Kometen?

Diese naheliegende Vermutung kam schon früh auf. Dagegen spricht jedoch die Form der Senke, die im Mittel zwei Kilometer tiefer liegt als das Hochland. Ihr Rand verläuft unregelmäßig; eine Impaktstruktur sollte hingegen annähernd kreisrund sein. Aus diesem Grund haben manche Forscher das Borealisbecken nicht dem Einschlag eines einzelnen, sondern einer ganzen Serie von Asteroiden zugeschrieben. Doch ein solches kosmisches Trommelfeuer scheint sehr unwahrscheinlich – zumal es seltsamerweise nur eine Hälfte des Mars getroffen hätte.

Möglich wäre auch, dass sich die Form des Beckens nachträglich verändert hat. Allerdings galt die Tiefebene lange als nach geologischen Maßstäben junge Struktur, der kaum Zeit für Formänderungen blieb. Dafür sprach das weit gehende Fehlen von Meteoritenkratern, die den Hochländern des Mars oder anderen Himmelskörpern wie dem Erdmond ein zernarbtes Aussehen verleihen. Ihre Zahl und Dichte ist ein guter Indikator für das Alter einer Planetenoberfläche, wenn sie durch Erosion kaum verändert wurde.

Im Jahr 2006 jedoch zeigten Messungen mit dem Bodenradar der Raumsonde Mars Express, dass die Tiefebene fast ebenso viele Kraternarben wie das Hochland hat; nur sind diese – aus welchen Gründen auch immer – unter der Oberfläche verborgen und auf Satellitenbildern daher unsichtbar. Das Borealisbecken ist also kaum jünger als der Rest des Marsbodens; es entstand bereits vor rund vier Milliarden Jahren, als der Rote Planet seiner Kinderstube noch nicht entwachsen war.



LINKS: NASA; RECHTS: MIT, JEFFREY ANDREWS-HANNA UND MARIA ZUBER; NASA, JPL, BRUCE BANERDT

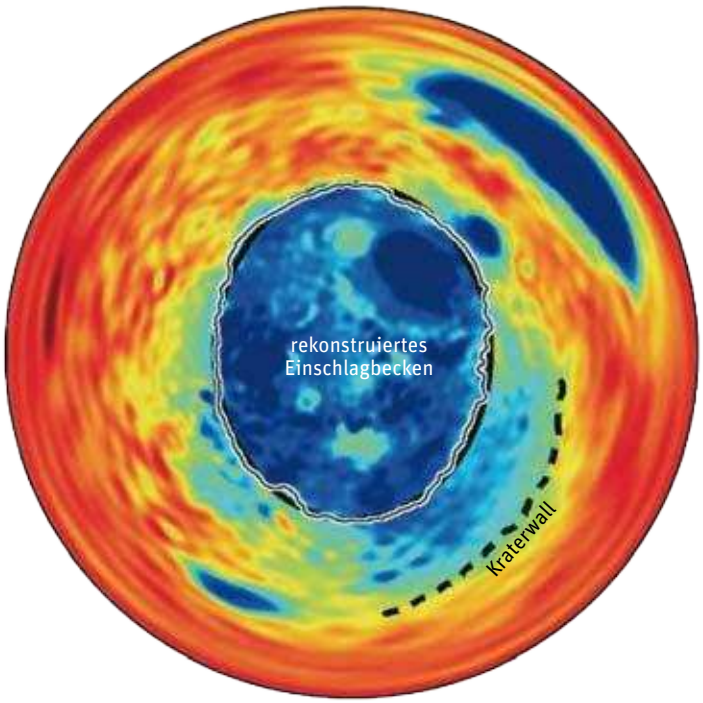


ILLUSTRATION: JEFFREY ANDREWS-HANNA

So könnte der Einschlag eines gigantischen Asteroiden ausgesehen haben, der die Zweiteilung der Marsoberfläche erklären würde. Die Illustration beruht auf dem Ergebnis von dreidimensionalen Computersimulationen des Ereignisses.

Bei einem so hohen Alter kann man nicht erwarten, dass die Senke die gleiche Form hat wie zum Zeitpunkt ihrer Entstehung. In vier Milliarden Jahren ist viel passiert: Starker Vulkanismus während der Noachischen Epoche, also vor etwa 4,3 bis 3,5 Milliarden Jahren, überprägte das Antlitz des Planeten und begrub die Grenze zwischen Hoch- und Tiefland an manchen Stellen unter bis zu 30 Kilometer hohen Basaltbergen. Damit ließe sich erklären, dass ein einstmals rundes Becken heute eine unregelmäßige Form hat.

Mit dieser Idee im Hinterkopf versuchten kürzlich Jeffrey C. Andrews-Hanna vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und seine Kollegen, den Einfluss des Vulkanismus auf die Krustendicke zu bestimmen und die ursprüngliche Form des Beckens zu rekonstruieren. Indem sie die Topografie des Mars mit seinem Gravitationsfeld verglichen, gelang es ihnen tatsächlich, die verborgene Grenzlinie aufzuspüren. Das ursprüngliche Becken maß demnach 10 600 mal 8500 Kilometer. Es war also rund, aber nicht kreisförmig, sondern elliptisch.

Diese Höhenkarte eines Ausschnitts vom Mars (links), die auf Messungen des Laser-Altimeters MOLA an Bord der Sonde Mars Global Surveyor beruht, verdeutlicht den krassen Unterschied zwischen dem Borealisbecken auf der Nordhalbkugel des Planeten und dem südlichen Hochland. Forscher haben nun die ursprüngliche Form dieser riesigen Senke rekonstruiert und als Kreisprojektion der gesamten Oberfläche dargestellt (rechts). Dabei erscheint die Tiefebene als elliptisches Einschlagbecken. Die durchgezogene schwarze Linie markiert den ursprünglichen Kraterrand, die gestrichelte einen zusätzlichen äußeren Wall. Die topografische Höhe der dargestellten Regionen nimmt von blau über gelb nach rot zu.

Rekonstruktion einer Katastrophe

Das ist ungewöhnlich für einen Einschlagkrater. Die meisten Impaktstrukturen im Sonnensystem haben Kreisform – im Einklang mit den Ergebnissen gängiger Computersimulationen, wonach nur bei sehr flachem Einschlagwinkel ovale Krater entstehen. Diese Modellierungen erweisen sich jedoch in diesem Fall als unbrauchbar; denn sie gehen allesamt von einem kleinen Projektil aus, für das sich die Planetenoberfläche als eine plane Ebene darstellt. Das Borealis-Einschlagbecken auf dem Mars, wenn es denn ein solches ist, wäre aber die größte bekannte Impaktstruktur im Sonnensystem, viel gewaltiger als die größten vergleichbaren Meteoritenkrater – schließlich macht es mehr als ein Drittel der gesamten Marsoberfläche aus. Bei solchen Dimensionen spielt die Kugelform des Planeten eine wichtige Rolle; sie bewirkt etwa, dass auch bei steilem Auftreffwinkel ein elliptischer Krater entstehen kann.

Um die Dynamik eines Einschlags von planetaren Ausmaßen verstehen zu können, waren also neue Computermodelle nötig, welche die gekrümmte Planetenoberfläche berücksichtigen. Margarita M. Marinova vom California Institute of Technology in Pasadena und ihre Mitarbeiter führten solche Berechnungen durch. Dabei stellte sich heraus, dass ein Einschlagkrater von der Größe und Form des Borealisbeckens von einem 1600 bis 2700 Kilometer großen Asteroiden verursacht werden kann, der mit einer Geschwindigkeit von 6 bis 10 Kilometern in der Sekunde und unter einem Winkel von 30 bis 60 Grad zur Oberfläche auf den Mars trifft. Das Geschoss wäre demnach fast ein Drittel so groß wie der Mars selbst gewesen, dessen Durchmesser 6780 Kilometer beträgt. Ein solch dramatisches Ereignis ist für das frühe Sonnensystem durchaus vorstellbar.

Die Qualität von Marinovas Simulationen leidet allerdings darunter, dass die räumliche Auflösung wegen der begrenzten Rechenkapazität nur 118 Kilometer betrug – mehr als doppelt so viel wie die angenommene Dicke der Marskruste. Die Ergebnisse darüber, wie viel Materie beim Einschlag ausgeworfen wird und welche Form der Krater letztlich annimmt, sind deshalb sehr ungenau.

Aus diesem Grund haben Francis Nimmo von der University of California in Santa Cruz und seine Kollegen in einer weiteren Untersuchung ein vereinfachtes, zweidimensionales Modell verwendet, das eine weit bessere Auflösung von 25 Kilo-

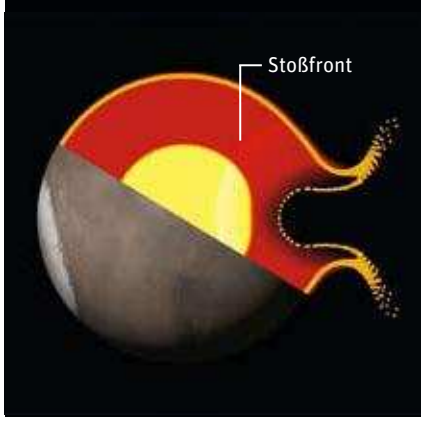


ILLUSTRATION: FRANCIS NIMMO, UCSC

Dieser Querschnitt durch den Mars fünf Minuten nach dem Einschlag eines riesigen Asteroiden beruht auf einer vereinfachten, zweidimensionalen Computersimulation des Ereignisses mit relativ hoher Auflösung. Teile der Marskruste (orangefarbene Punkte) werden ins All geschleudert, während eine Stoßwelle bis zum geschmolzenen Kern des Planeten vordringt.

metern erreicht. Da sie sich auf vertikale Einschläge beschränkten, unterscheiden sich ihre Resultate in Details von denen der Gruppe um Marinova – etwa in der beim Einschlag freigesetzten Energie. Im Endergebnis sind sich die beiden Teams jedoch einig: Das von Andrews-Hanna rekonstruierte Becken lässt sich durch den Aufprall eines großen Asteroiden überzeugend erklären.

Aber hat es sich tatsächlich so abgespielt? Den Beweis dafür bleiben die Simulationen schuldig. Immerhin liefern sie Hinweise zur Prüfung der Einschlaghypothese. So müsste sich die Kruste der Tiefebene in ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich von der des Hochlands unterscheiden. Ferner könnten zukünftige Landemissionen seismologische Untersuchungen durchführen, die Aufschluss über die innere Struktur des Untergrunds im Borealisbecken und seiner Grenzregion geben. Daran ließe sich erkennen, ob die Schichten so zertrümmert sind, wie das bei einem derart gewaltigen Einschlag zu erwarten ist. Parallel dazu könnten neue Marsrover durch die Untersuchung des Tiefland-Grundgesteins feststellen, ob es sich wirklich um die erstarrte Schmelzkruste eines vier Milliarden Jahre alten Impaktkraters handelt.

Ein riesiger Ozean?

Selbst wenn sich bestätigt, dass die Mars-Dichotomie von einem gigantischen Einschlag herrührt, bleiben allerdings Fragen offen. Anschließend war der gesamte Planet noch lange Zeit einem stetigen Bombardement aus dem All ausgesetzt. Wie und wodurch wurden die späteren Meteoritenkrater des Tieflands begraben? Warum sind sie im Hochland intakt geblieben? Irgendetwas muss in der späteren Marsgeschichte dafür gesorgt haben, dass die Entwicklung der beiden Hälften weiter unterschiedlich verlief. War es ein Ozean, der das Borealisbecken füllte, wobei er die Krater zum Teil erodierte und zum Teil unter Ablagerungen begrub?

Zu dieser Vorstellung passt die Entdeckung, dass Wasser auf dem frühen Mars offenbar weit verbreiteter war als bisher angenommen. Erst vor Kurzem wiesen John Mustard von der Brown University in Providence (Rhode Island) und Kollegen mit Hilfe des CRISM-Spektrometers an Bord der Sonde Mars Reconnaissance Orbiter nach, dass hydratisierte Schichtsilikate über einen großen Teil des Planeten verteilt sind. Sie müssen durch das Einwirken großer Wassermengen über einen langen Zeitraum entstanden sein. Während der Noachischen Periode, als die Vulkane die Marsoberfläche umgestalteten, war Wasser auf dem Roten Planeten demnach so gut wie allgegenwärtig. Demnach könnte es auch – flüssig oder gefroren – die gesamte Tiefebene bedeckt und die Spuren des Meteoritenbombardements verwischt haben.

Auch die neuen Ergebnisse schließen nicht aus, dass die Hemisphären-Dichotomie doch interne Ursachen hat – etwa Vorgänge, die der Plattentektonik auf der Erde ähneln. Obwohl sich die Hinweise auf einen gigantischen Einschlag verdichtet haben, ist das Rätsel der unruhigen Vergangenheit unseres roten Nachbarn noch keineswegs endgültig gelöst.

Jan Hattenbach ist freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

TECHNIK 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

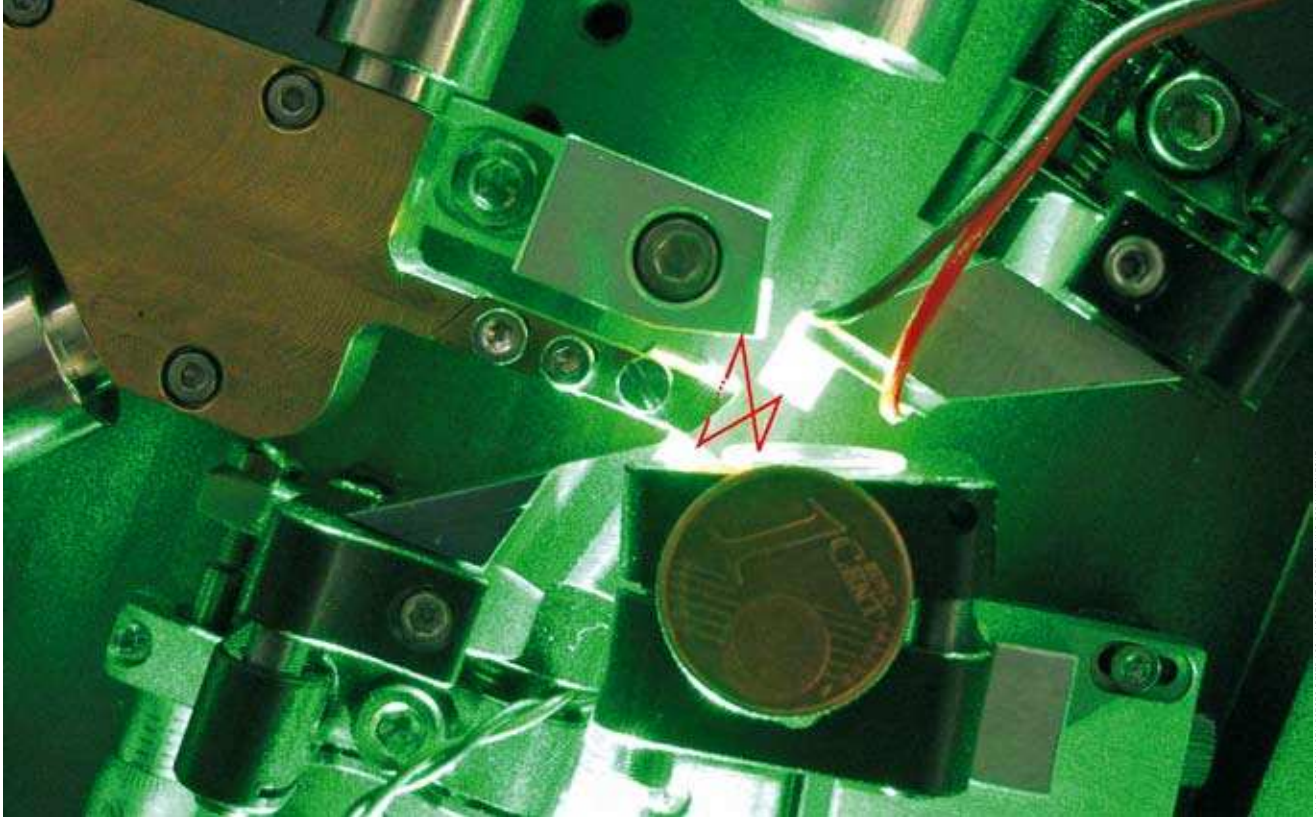
Laserblitze im Rekordtakt

In Konstanz wurde der weltweit schnellste Ultrakurzpulslaser gebaut. Er eröffnet der Präzision von Frequenzmessungen neue Dimensionen. Dadurch erhöht er auch die Chancen zum Aufspüren ferner erdähnlicher Planeten.

Von Albrecht Bartels und Dirk Heinecke

Zehn Milliarden Lichtblitze pro Sekunde sendet ein Laser aus, den wir am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz und bei der ebenfalls am Bodensee ansässigen Firma Gigaoptics gemeinsam konstruiert haben. Diese Pulsrate von zehn Gigahertz ist Weltrekord: Sie übertrifft die bisherigen Höchstwerte um ein bis zwei Größenordnungen. Jeder einzelne Lichtpuls blitzt dabei nur für die unvorstellbar kurze Zeit von 42 Femtosekunden (0,000 000 000 000 042 Sekunden) auf, weshalb man auch von einem Femtosekundenlaser spricht. In dieser Zeit legt Licht gerade einmal eine Strecke zurück, die dem Durchmesser eines menschlichen Haares entspricht.

Damit sich solch kurze Strahlungspulse bilden, müssen zwischen den Spiegeln des Lasers – im so genannten Resonator – Tausende von stehenden elektromagnetischen Wellen synchron schwingen. Für sie gilt die Bedingung, dass die Strecke für ihren Hin- und Rückweg exakt einem Vielfachen ihrer Wellenlänge entspricht. Tatsächlich verhält sich unser Femtosekundenlaser dadurch wie ein Ensemble aus Tausenden von Einzellasern, auch Moden genannt, mit exakt definierten und eng benachbarten Frequenzen konstanten Abstands. Die von ihm ausgesandte Strahlung wird daher als Frequenzkamm bezeich-



ALLE ABBILDUNGEN DIESES BEITRAGS: ALBRECHT BARTELS UND DIRK HEINECKE

Im Innern des neuen Ultrakurzpulslasers befindet sich ein Ringresonator mit vier Spiegeln. Der Lichtweg ist rot angedeutet.

net. Für die Nutzung solcher Frequenzkämme zur hochpräzisen Vermessung von Lichtwellen erhielten der deutsche Physiker Theodor Hänsch und sein US-Kollege John Hall 2005 den Physik-Nobelpreis (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 20).

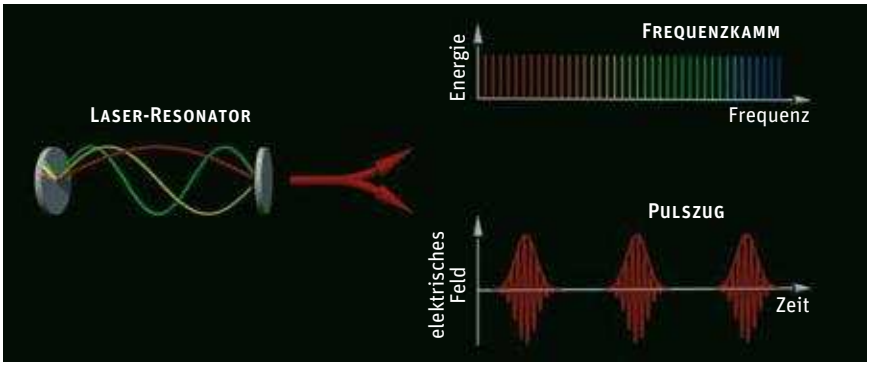
Die Rekordpulsrate erreichten wir im Wesentlichen durch Verkürzung des Spiegelabstands. Das macht unseren Laser auch zum kleinsten jemals gebauten seiner Art. Sein Resonator ist nicht größer als ein Cent-Stück.

Unser Rezept zur Erhöhung der Pulsrate – Verkürzung des Spiegelabstands – klingt naheliegend und im Grund recht einfach. Seine praktische Umsetzung aber wirft erhebliche Probleme auf. Die Hauptschwierigkeit ist, dass sich durch die große Zahl der Lichtblitze pro Zeiteinheit die auf jeden einzelnen entfallende Leistung, das heißt seine Intensität, dramatisch verringert: Die Pulse werden zu schwach. Die Kunst lag also darin, diese Leistungseinbußen auszugleichen. Das gelang uns, indem wir das Lasermedium (einen üblichen titandotierten Saphir) und die Brennweite der Spiegel sowie ihre Beschichtung (von der ihr Reflexionsvermögen abhängt) optimal aufeinander abstimmten.

Unser neuer ultraschneller Laser hat vielfältige Einsatzmöglichkeiten überall da, wo es auf die extrem genaue Messung von Frequenzen ankommt – so bei der Spektroskopie von atomaren Übergängen, beim Testen der Invarianz von Naturkonstanten oder bei der Entwicklung neuer, »optischer« Atomuhren.

Eine der interessantesten denkbaren Anwendungen ist sicherlich die Kalibrierung von astronomischen Spektrografen, die zur Suche nach extrasolaren Planeten dienen. Da solche Himmelskörper – im Gegensatz zu Sternen – selbst kein Licht aussenden, sind sie nicht direkt beobachtbar. Deshalb greifen Astronomen auf verschiedene indirekte Suchmethoden zurück.

Eine davon bedient sich der Wirkung eines Planeten auf das Spektrum des Lichts, das uns von seinem Zentralgestirn erreicht. Beide Objekte rotieren nämlich gemäß Newtons Gravitationsgesetz um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Der befindet sich wegen des extremen Massenunterschieds zwar meist innerhalb des Sterns, fällt aber nicht mit dessen Mittelpunkt zusammen. Dadurch vollführt auch das Zentralgestirn eine schwache Rotationsbewegung, bei der es



Im Resonator eines Femtosekundenlasers oszillieren Tausende von stehenden Wellen synchron. Die ersten drei Grundschwingungen sind hier schematisch dargestellt (links). Die vielen Einzelwellen erzeugen durch Überlagerung einen Zug gepulster Strahlung (rechts unten), während ihre Frequenzen eine regelmäßige Kammstruktur bilden (rechts oben).

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

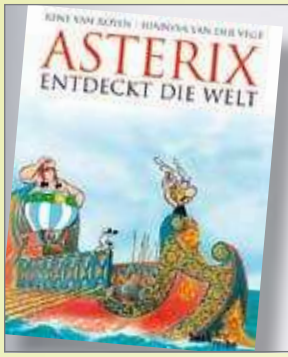
per Telefon:	06221 9126-743
per Fax:	06221 9126-751
per E-Mail:	service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Im Buch »Asterix entdeckt die Welt« zeigen zwei Historiker der Universität Amsterdam auf augenzwinkernde Weise, wie viel historisches Wissen in der beliebten Comicreihe verborgen ist.

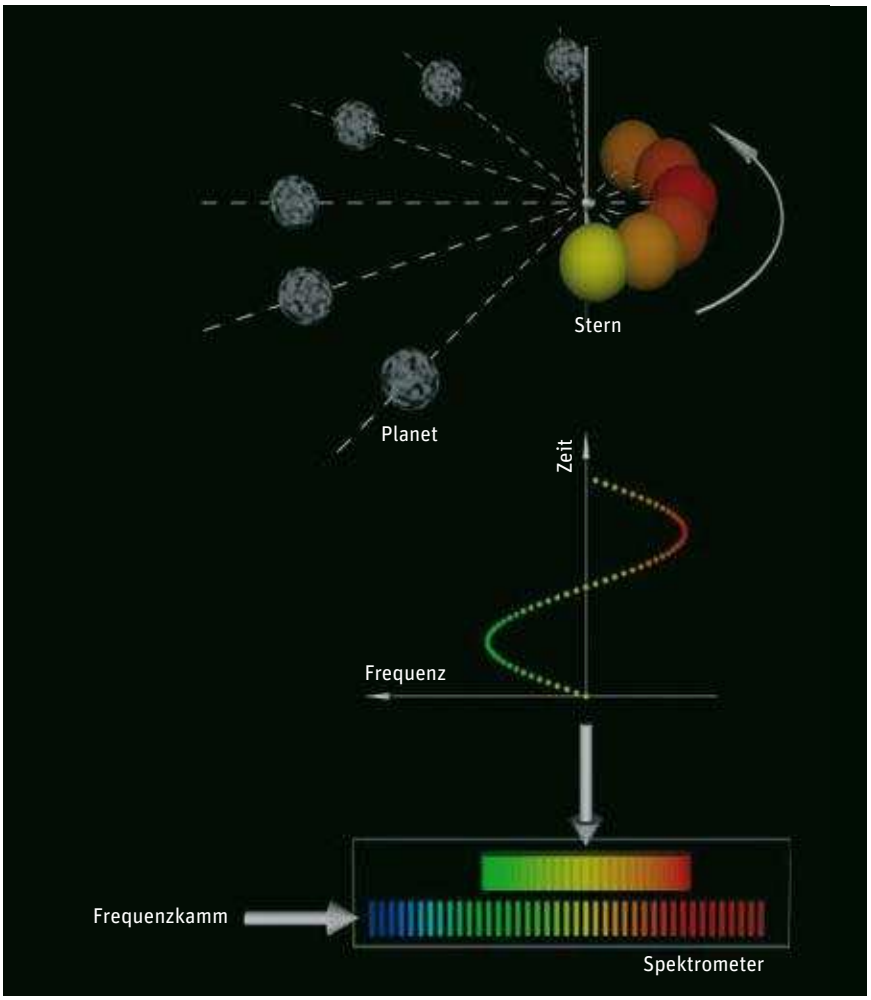
Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Lamy-Set »Dankeschön«
Die stilvollste Art, »Dankeschön« zu sagen: mit zehn kunstvoll kalligrafierten Büttenkarten und Umschlägen sowie einem Lamy-Schönschreibfüller

Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn



Ein Planet (dunkel) und der zugehörige Stern (hell) rotieren um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Auch der Stern bewegt sich daher periodisch von einem Beobachter weg oder auf ihn zu, was zu einer Rot- beziehungsweise Blauverschiebung des von ihm emittierten Lichts führt. Um sie zu entdecken, überlagert man die vom Teleskop aufgefangene Strahlung im Spektrometer mit einem Frequenzkamm-Lineal und vergleicht beide miteinander.

periodisch hin und her sowie auf einen Beobachter zu- und von ihm wegläuft. Synchron dazu wechselt auf Grund des Dopplereffekts das emittierte Licht seine Farbe. An dieser Frequenzänderung lässt sich nicht nur die Gegenwart eines Planeten erkennen; sie ermöglicht auch Rückschlüsse auf seine Masse, Bahn und Umlaufdauer.

Suche nach einer zweiten Erde

Um derartige Änderungen zu ermitteln, fangen Astronomen das Sternenlicht mit einem Teleskop ein und vergleichen es mit dem Spektrum einer Gaslampe mit Emissionslinien genau bekannter Frequenz. Solche Lampen sind allerdings in ihrer Variationsbreite und Präzision begrenzt. Bislang ließen sich mit dieser Methode deshalb nur Planeten mit einem Vielfachen der Erdmasse entdecken.

Frequenzkämme auf der Basis von Femtosekundenlasern ermöglichen eine sehr viel präzisere Kalibrierung der Spektrografen und könnten so helfen, künftig auch Planeten von der Größenordnung der Erde aufzuspüren. Diese vergleichsweise kleinen Körper verursachen an ihrem Stern nämlich nur Geschwindigkeitsänderungen von wenigen Zentimetern pro Sekunde, was einer relativen Verschiebung der Lichtwellenlänge um zehn Billionstel (10^{-11}) entspricht und die bisher mögliche Messgenauigkeit bei Weitem übersteigt.

Ein Frequenzkamm lässt sich mit einem Lineal vergleichen, bei dem jeder Teilstrich einer der genannten Moden entspricht. Diese Teilstriche haben die enorme Genauigkeit einer Atomuhr. Allerdings war es bislang nicht möglich, ein solches Frequenzkamm-Lineal direkt abzulesen. Die Teilstriche lagen, da ihr Abstand durch die Pulsrate des Femtosekundenlasers gegeben ist, zu dicht beisammen, um sich getrennt voneinander wahrnehmen zu lassen. Daher mussten in jüngsten Experimenten zur Kalibrierung astronomischer Spektrografen an der Havard University und dem Massachusetts Institute of Technology, beide in Cambridge, sowie dem National Institute of Standards and Technology der USA (NIST) in Boulder (Colorado) die verwendeten Frequenzkämme mit aufwändigen und unökonomischen Filtermethoden so ausgedünnt werden, dass nur noch jeder zehnte bis zwanzigste »Zinken« übrig war. Der Rest blieb ungenutzt.

Unser neuer Laser bringt hier einen echten Durchbruch; denn sein Frequenzkamm ist wegen der hohen Pulsrate viel weniger dicht. Damit entfällt der Filter-Schritt: Alle Zinken lassen sich nutzen und haben zugleich eine zehn- bis hundertmal höhere Intensität, was sich positiv auf die Messgeschwindigkeit und -präzision auswirkt.

Im Rahmen einer Kooperation mit dem NIST wollen wir nun untersuchen, ob und wie sich das neue Gerät tatsächlich zum Aufspüren kleiner extrasolarer Planeten eignet. Scott Diddams, Forschungsgruppenleiter am NIST, ist zuversichtlich und nennt auch den Grund: »Der Konstanzer Laser besticht insbesondere durch seine einfache Konstruktion und Kompaktheit. Dabei ist er in der Lage, einen präzisen Frequenzkamm mit einem Leistungsniveau zu erzeugen, das durch keine andere Technologie erreicht wird.«

Selbst wenn die Kalibrierung wie gewünscht funktioniert, bedarf es allerdings weiterer technischer Fortschritte, bis die Methode wirklich funktioniert. Insbesondere muss die Auflösung der Spektrografen noch verbessert werden. Dennoch stehen die Chancen nicht schlecht, dass die Entdeckung der ersten fernen Schwester der Erde anhand von Dopplermessungen nicht mehr lange auf sich warten lässt. Sie wäre jedenfalls eine echte Sensation.

Albrecht Bartels und **Dirk Heinecke** forschen am Centrum für Angewandte Photonik der Universität Konstanz. Bartels ist zugleich Geschäftsführer der Gigaoptics GmbH.

ÖKOLOGIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Die Stunde der Schmarotzer

Nach Untersuchungen von US-Forschern haben Parasiten einen deutlich größeren Anteil an der Stoffbilanz von marinen Ökosystemen als vermutet. So entspricht ihre Biomasse derjenigen aller Wirbeltiere ihres Lebensraums.

Von Lars Fischer

Die berühmteste Paarbeziehung der Ökologie – die zwischen Räuber und Beute – ist in Wirklichkeit eine Menage à trois. Während die einen fressen und die anderen gefressen werden, wirkt eine dritte Gruppe im Verborgenen: Parasiten zweigen Energie von ihren Wirten ab und nutzen sie für eigene Zwecke. Den ausgebeuteten Tieren kann dadurch erheblicher Schaden entstehen, was teils sogar ihre Evolution beeinflusst. So gilt es als wahrscheinlich, dass die weite Verbreitung der sexuellen Fortpflanzung unter anderem auf dem Selektionsdruck durch Schmarotzer beruht.

Welches Gewicht Parasiten in den Stoff- und Energiebilanzen ganzer Ökosysteme haben, ist angesichts ihrer komplexen Lebenszyklen und ihrer engen Beziehungen mit den Wirtsarten allerdings nicht leicht zu quantifizieren. »Parasiten sind im Nahrungsnetz schwierig einzuordnen«, erklärt der Biologe Harald Asmus vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, der auf Sylt die Nahrungsnetze mariner Ökosysteme erforscht. »Als Beteiligte am Energiehaushalt ihrer Wirtsart sind sie in deren Stoffflüssen schon zum Teil enthalten.« Weil die allermeisten Schmarotzer zudem um mehrere Größenordnungen kleiner sind als ihre Wirte, wird ihre Biomasse bei den Bilanzierungen gewöhnlich vernachlässigt.

Nun haben genaue Untersuchungen in einem Ökosystem jedoch ergeben, dass Parasiten unter Umständen einen unerwartet hohen Anteil der tierischen Biomasse ausmachen können (Nature, Bd. 454, S. 515). In einem fünf Jahre andauernden Zensus an drei Flussmündungen im mexikanischen Bundesstaat Baja California und an der kalifornischen Pazifikküste hat ein Team um den Biologen Armand M. Kuris von der University of California in Santa Barbara Daten über Häufigkeit und Biomasse von insgesamt 199 frei lebenden Arten und ihren Schmarotzern gesammelt. An den 69 Untersuchungsstellen bringen die Parasiten demnach, auf die Fläche bezogen, so viel auf die Waage wie alle Wirbeltiere ihres Lebensraums zusammengenommen.

Den größten Anteil stellen dabei die Kastratoren: wenige Millimeter lange Saugwürmer (Trematoden), die ihren Wirten die Fortpflanzungsfähigkeit rauben. Diese werden dadurch zu bloßen Fabriken für Trematodenlarven oder Zerkarien, wie sie auch heißen. Bei einigen Wirtsarten sind mehr als die Hälfte der Tiere befallen.

Als Paradebeispiel kann *Cerithidea californica* gelten. Diese Schnecke ist die häufigste Tierart im untersuchten Gebiet und Opfer 18 verschiedener Spezies von Saugwürmern. Praktisch alle ausgewachsenen Exemplare sind infiziert, und die Parasiten machen im Schnitt 22 Prozent ihrer Körpermasse aus. Die befallenen Tiere scheiden solche Mengen an Zerkarien aus, dass deren Masse das Gesamtgewicht der Vögel im Untersuchungsgebiet, die dort an der Spitze der Nahrungskette stehen, um das Drei- bis Neunfache übertrifft. Die Biomasse sämtlicher Parasiten in den Ästuaren entsprach drei bis 13 Prozent derjenigen aller Räuber, die von den gleichen Beutetieren leben.

Vorteil für Einwanderer

Für Juliane Filser vom Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien der Universität Bremen ist das Ergebnis der Untersuchung allerdings nur auf den ersten Blick erstaunlich. Bei genauerer Betrachtung könne es nicht wirklich überraschen. Zwar sind Parasiten, so ihre Begründung, im Vergleich zu anderen Gliedern der Nahrungskette praktisch unsichtbar. Dennoch reicht ihr Einfluss weit über einzelne Arten hinaus und wirkt gestaltend auf ganze Ökosysteme.

So könnte die Macht der Schmarotzer etwa die Ausbreitung invasiver Arten begünstigen. Schon 2003 stellten US-Forscher bei Untersuchungen an 26 Spezies aus sieben Tierklassen fest, dass neu eingewanderte Gruppen, die so genannten Neozoen, im Schnitt nur halb so viele Parasitenarten trugen. Außerdem war der Anteil der befallenen Tiere an der Popula-

TODD C. HUSPENI, UNIVERSITY OF WISCONSIN, STEVENS POINT (UWSP)

Bei von Trematoden befallenen Meeresschnecken der Art *Cerithidea californica* machen die Schmarotzer bis zu 40 Prozent der Körpermasse aus. Hier ist ein infiziertes Tier (links) einem parasitenfreien (rechts) gegenübergestellt. Die Schale wurde entfernt.

tion geringer als bei einheimischen Arten. »Parasit und Wirt machen ja eine Koevolution durch«, erklärt Filser. »Wenn eine Spezies in ein neues Ökosystem einwandert, trifft sie dort auf weniger an sie angepasste Parasiten, und das kann dazu führen, dass sie sich sehr stark ausbreitet.«

Doch vielleicht sind die von den US-Wissenschaftlern untersuchten Ökosysteme auch gar nicht repräsentativ. Asmus hält es für möglich, dass die extreme Verbreitung von Parasiten in diesem Fall nur die Folge einer sehr hohen Schadstoffbelastung ist, wegen der die Abwehrmechanismen der Organismen nur unzureichend funktionieren. Im Sylter Wattenmeer, das kaum unter Umweltverschmutzung leidet, dürfte nach seiner Ansicht der Anteil der Parasiten an der Biomasse deutlich geringer sein. »In den stärker belasteten Ästuaren von Elbe und Weser oder vor der hochgradig industrialisierten holländischen Küste kann das wieder ganz anders aussehen«, glaubt er. Für quantitative Vergleiche, die derartige Vermutungen erhärten oder widerlegen könnten, reichen die vorhandenen Daten allerdings nicht aus.

Ein Schwachpunkt der US-Untersuchung ist auch, dass die Forscher statt der Trockenmasse das Frischgewicht der untersuchten Arten verglichen haben. Weil der Wassergehalt zwischen einzelnen Tiergruppen stark schwanken kann – bei Vögeln ist er zum Beispiel wesentlich geringer als bei Fadenwürmern –, lassen sich die Zahlen nur bedingt miteinander vergleichen. Asmus meint deshalb: »Qualitativ sind die Ergebnisse der Studie sicherlich zutreffend, aber die genauen Relationen könnten sich noch um den Faktor zwei oder drei verschieben.«

So wirft die Untersuchung von Kuris und seinen Kollegen nur ein erstes Schlaglicht auf einen Sachverhalt, dem Biologen in der Vergangenheit zu wenig Beachtung schenkten. Sie belegt, dass Parasiten im Stoff- und Energiehaushalt ganzer Ökosysteme eine überraschend große Rolle spielen können. Ihre tatsächliche Bedeutung in den verschiedensten Lebensgemeinschaften lässt sich daraus aber nicht abschätzen. Dazu bedarf es weiterer gründlicher Studien. Nicht nur beim Menschen ist eine Menage à trois eine komplizierte, schwer durchschaubare Angelegenheit.

Lars Fischer ist freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

NERVENKONTAKTE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Verbindung auf Probe

Nach neuen Erkenntnissen verhalten sich Nervenzellen erstaunlich ökonomisch. Bevor sie sich fest verschalten, stellen sie erst probeweise eine lose Verbindung her. Nur bei genügend hohem Informationsfluss wird daraus ein dauerhafter Kontakt.

Von Andreas Baumann

Unser Gehirn ist eine Dauerbaustelle. Jeden Tag werden dort Millionen neue Verbindungen aufgebaut und alte wieder abgeschafft. Die Rede ist von den Synapsen: Schaltstellen, an denen ein elektrisches Signal in chemischer Form zwischen zwei Nervenzellen übertragen wird. Jedes der etwa 100 Milliarden Neurone in unserem Gehirn ist über solche Kontakte mit vielen – bis zu einigen tausend – anderen verbunden.

Dieses Informationsnetz unterliegt je nach den Anforderungen einem ständigen Umbau. Kommt eine Synapse zu selten zum Einsatz, wird sie als unnötig eingestuft und abgebaut. Doch nicht erst im Nachhinein funktioniert diese strenge Auslese. Wie Christian Lohmann und Tobias Bonhoeffer vom Max-Planck-Institut für Neurobiologie in Planegg-Martinsried jetzt herausgefunden haben, existiert ein Selektionsverfahren, mit dem Nervenzellen vor dem Zustandekommen einer Synapse bereits überprüfen können, ob diese auch sinnvoll wäre. Fällt der Test negativ aus, wird sie erst gar nicht gebildet (Neuron, Bd. 59, S. 253).

Suche nach dem richtigen Partner

Diese Überprüfungen beginnen schon sehr früh: Das Netz aus synaptischen Verbindungen zwischen den Nervenzellen entsteht während der Entwicklung des Gehirns im Embryo und bis in die späte Kindheit hinein. Dabei müssen die jungen Neurone unter einer Vielzahl von potenziellen Verknüpfungspartnern die richtigen finden. Wie gelingt ihnen das?

Vom Zellkörper eines Neurons, dem so genannten Soma, gehen sehr viele kurze, verästelte Fortsätze aus. Diese so genannten Dendriten tragen jeweils zahlreiche kleine Ausstülpungen namens Filopodien. Außerdem entspringt am Zellkörper ein dünnerer, langer Fortsatz, der bei menschlichen Nervenzellen bis zu einen Meter lang werden kann und Axon heißt. Er spaltet sich erst an seinem Ende in viele kleine Verzweigungen auf: die Axonendköpfe. Diese treten mit den Filopodien auf den Dendriten anderer Zellen in Kontakt und bilden so die Synapsen. Beide verschmelzen dabei nicht miteinander, sondern bleiben durch einen schmalen Spalt getrennt.

Beim Reizen einer Nervenzelle entsteht an deren Außenmembran ein elektrisches Potenzial, das am Axon entlangläuft. An dessen Ende bewirkt es dann die Ausschüttung von Neurotransmittern. Diese chemischen Botenstoffe überqueren den synaptischen Spalt und heften sich an passende Rezeptoren auf der

Anzeige

Springers Einwürfe

Kilometerlange Quantenobjekte

»Spukhafte Fernwirkung« über Riesendistanz

In der Quantenwelt geht es seltsamer zu, als nicht nur meine Schulweisheit sich träumen lässt. Sogar ein revolutionärer Kopf wie Einstein weigerte sich, die Quantentheorie für komplett zu halten; er meinte, dahinter müssten klassische Mechanismen stecken, und postulierte so genannte verborgene Parameter, um die »spukhafte Fernwirkung« zwischen zwei Komponenten eines Quantensystems zu erklären. Solche »verschränkten« Komponenten verhalten sich nämlich, als wären sie zwei Zauberwürfel, die zwar pro Wurf eine zufällige Augenzahl zeigen – aber beide dieselbe.

In der Frühzeit der Quantentheorie tröstete man sich damit, derlei Spuk sei bloß eine Spezialität der unanschaulichen Mikrowelt, zu der unser Alltagsverstand ohnehin keinen unmittelbaren Zugang hat. Doch in den letzten Jahren gelingen den Physikern experimentelle Kunststücke, welche die Grenze zwischen Mikro- und Makrokosmos immer mehr verwischen. Den jüngsten Coup landete jetzt eine Gruppe um Daniel Salart von der Universität Genf (Nature, Bd. 454, S. 861).

Die Forscher erzeugten in ihrem Labor zunächst eine Reihe mikroskopischer Quantenobjekte aus paarweise verschränkten Photonen – Lichtquanten – und vergrößerten jedes Paar immens, indem sie die Komponenten separat durch das öffentliche Glasfasernetz zu zwei kilometerweit entfernten Ortschaften leiteten. Dort wiesen Lichtdetektoren nach, dass die Photonenpaare auch über eine Entfernung von 18 Kilometer Luftlinie noch immer verschränkt waren: Die Quantenpartner verhielten sich streng korreliert, analog zu besagten Zauberwürfeln.

Ist etwas klassisch Physikalisches vorstellbar – eine Kraft, ein Feld –, das die Eigenschaften der Lichtquanten über eine so große Distanz hinweg aufeinander abstimmt? Das Schweizer Team rechnete aus, dass sich ein Signal, das zur Koordination dienen könnte, mit mindestens zehntausendfacher Lichtgeschwindigkeit ausbreiten müsste. Das steht in krassem Widerspruch zu dem Grundprinzip, wonach nichts schneller sein darf als das Licht.

Mit solchen Experimenten wird der Ausrede, die Quantenphysik sei zwar seltsam, treibe aber ihr Unwesen nur in der Mikrowelt, jeder Boden entzogen. Freilich war dieses Argument nie viel wert. Zum Beispiel: Dass Elektronen in Atomen unterschiedliche Energieniveaus besetzen, ist eine Folge des Ausschließungsprinzips von Wolfgang Pauli. Ohne dieses rein quantenmechanische Gesetz gäbe es keine chemischen Elemente, also keine Materie, wie wir sie kennen. Demnach ist unsere Alltagswelt das Produkt einer Quantenregel. Diese mathematische Vorschrift verbietet einfach, dass Elektronen – anders als Photonen – denselben Zustand einnehmen. Dafür gibt es ebenfalls keine klassische Erklärung, etwa durch eine abstoßende Kraft.

Und wenn wir schon dabei sind: So besonders anschaulich ist auch der klassische Kraftbegriff nicht. Weder Newtons augenblicklich über beliebige Entfernungen wirkende Schwerkraft noch Einsteins Gravitation als Krümmung der Raumzeit entsprechen unserer an Druck und Stoß geschulten Alltagsphysik. Und allen mechanischen Modellen des elektromagnetischen Felds – Stichwort Äther – entzog Einstein höchstpersönlich die Grundlage.

Letztlich müssen wir uns, denke ich, in der Physik mit rein mathematischen Beschreibungen zufriedengeben, deren technische Anwendungen uns für ihre Unanschaulichkeit reich entschädigen. Die Quantenverschränkung ist nur der bislang letzte Ruck, der unseren Verstand aus seinen gewohnten Bahnen wirft, wenn wir staunend begreifen, wie fremd uns die Wirklichkeit im Grunde ist.

Michael Springer

gegenüberliegenden Seite. Dort erzeugen sie wiederum ein Membranpotenzial, das bei ausreichender Intensität die Empfängerzelle ebenfalls feuern lässt.

Die Ausbildung einer Synapse verbraucht allerdings viel Energie und dauert bis zu zwei Tage. Das wäre eine Menge vergeblicher Mühe, sollte sich die Verknüpfung im Nachhinein als unnötig herausstellen und gleich wieder abgebaut werden. Lohmann und Bonhoeffer vermuteten deshalb schon länger, dass die Zellen zunächst über eine vorläufige Verbindung auf Probe miteinander kommunizieren können. Auf diese Weise wäre es möglich, vorab den voraussichtlichen Informationsfluss durch eine potenzielle Synapse zu ermitteln.

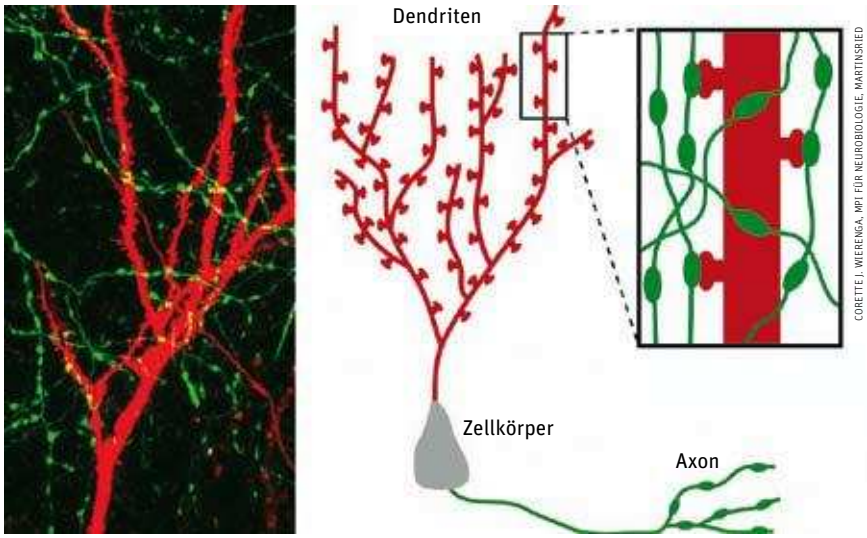
Kalzium vermittelt stabile Kontakte

Eine Schlüsselrolle bei diesem Prozess erwarteten die Forscher von den Filopodien. Sie sind während der Entwicklung synaptischer Verbindungen in großer Zahl vorhanden und zeichnen sich durch schnelles Wachstum und hohe Beweglichkeit aus. Innerhalb von Minuten oder gar Sekunden stülpen sie sich aus den Dendriten aus oder ziehen sich wieder zurück.

Um Klarheit zu gewinnen, behandelten die zwei Forscher einzelne Zellen von Mäusen und Ratten mit Fluoreszenzfarbstoffen und betrachteten sie unter dem Mikroskop. Dabei machten sie eine interessante Beobachtung: Trifft ein Filopodium auf ein Axon, entsteht eine kurzzeitige Verbindung. Manchmal entwickelt sich daraus eine Synapse, aber in vielen Fällen wird der Kontakt bald nach seinem Zustandekommen wieder gelöst. Außerdem konnten Lohmann und Bonhoeffer beobachten, wie Filopodien an dem Axon entlangwanderten und offenbar nach geeigneteren Stellen suchten.

Eingehende Untersuchungen enthüllten auch die zu Grunde liegenden elektrochemischen Vorgänge. Demnach steigt im Filopodium direkt nach der Kontaktaufnahme für ungefähr eine Sekunde die Konzentration an positiv geladenen Kalziumionen. Bei ihren Messungen fiel den Forschern auf, dass bei später stabilen Synapsen viele weitere solche Kalziumsignale in kurzen Abständen folgten. Blieben sie selten, war die Verbindung zwischen den beiden Nervenzellen dagegen mit großer Wahr-

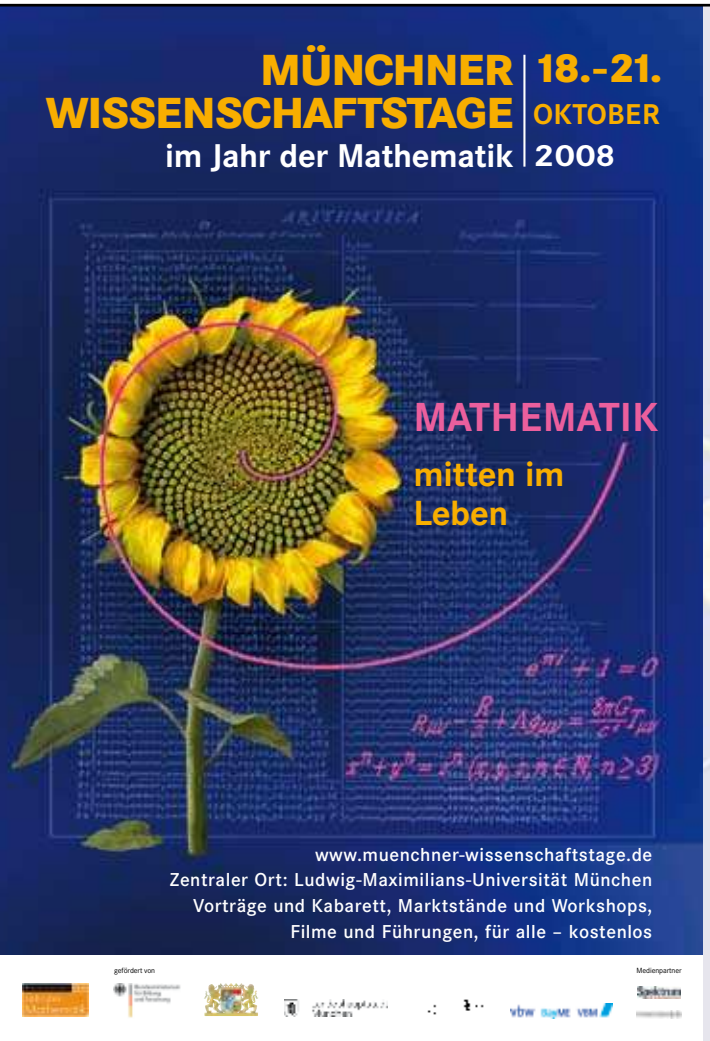
Zwei Nervenzellen treten in Kontakt miteinander, indem ein Axonendkopf des einen Neurons und ein Filopodium auf einem Dendriten des anderen sich verbinden. Dieser Vorgang ist rechts schematisch gezeigt. Wie sich nun herausstellte, ist die Verbindung zunächst nur vorläufig. Erst wenn sie genügend Signale übermittelt, entsteht daraus eine dauerhafte Synapse. In der mikroskopischen Aufnahme links wurden die Axone grün und die Dendriten rot markiert.



scheinlichkeit nicht von Dauer. Wie die Neurone von der Häufigkeit der Kalziumsignale auf die Qualität der späteren Verbindung rückschließen können, ist vorerst allerdings unklar.

In jedem Fall bestätigen die Beobachtungen der beiden Wissenschaftler, dass junge Neurone tatsächlich mit einem Kontrollmechanismus überprüfen, wie sinnvoll die Ausbildung einer Synapse an einem bestimmten Punkt ist. Eine solche Vorauswahl scheint auch nötig. Das Gehirn ist ohnehin schon das Organ mit dem größten Energieverbrauch – bei nur etwa zwei Prozent der Körpermasse beansprucht es gut 15 Prozent des Ruhe-Umsatzes. Ohne das genannte Screening wäre der Wert noch um einiges höher. »Die Effizienz dieser Methode hat uns beide erstaunt«, berichtet Tobias Bonhoeffer. »So spart das Gehirn Zeit und Energie und sammelt gleichzeitig wichtige Informationen – sozusagen im Vorbeigehen.«

Andreas Baumann ist freier Journalist in Darmstadt.



Die 8. Münchner Wissenschaftstage vom 18.-21. Oktober 2008 greifen mit dem Titel „Mathematik – mitten im Leben“ das Anliegen des Wissenschaftsjahres 2008 auf, Verständnis und Begeisterung für die Mathematik und ihre vielfältigen Anwendungen zu wecken und zu fördern. Das Angebot richtet sich an Laien und an Fachleute, die über den Zaun ihres Fachgebietes blicken möchten, insbesondere aber an junge Menschen. Mathematisches, logisches Denken und Anwendungen in Naturwissenschaften, Medizin und Technik, in Kunst und Wirtschaft, in der Finanzwelt und Politik werden spannend und allgemeinverständlich dargeboten. Die Veranstaltungen – Vorträge und Diskussionen, Kabarett und Science Theater, Marktstände der Wissenschaft, Workshops und das Kinderprogramm – werden von Experten aus den Hochschulen, Forschungseinrichtungen und forschungsintensiven Unternehmen, von Pädagogen und Künstlern getragen.

Mathematik kennen viele Menschen nur aus der Schule und glauben, es handle sich dabei um Rechenregeln, die es zu erlernen und anzuwenden gelte. Mathematik ist mehr: Sie trägt wesentlich zum Verständnis der Welt bei, ist nützlich, faszinierend und lebendig und sie kann sehr wohl auch Spaß machen, wie die Münchner Wissenschaftstage zeigen.

Highlights sind die öffentliche, unterhaltsame Festveranstaltung mit Prominenz am Samstagabend mit musikalischen, historischen, zauberhaften und mathematischen Überraschungen, das Science Theater „Kalkül“ zum Prioritätenstreit von Leibniz und Newton am Sonntagabend und das musikalische Kabarett „Pisa Bach Pythagoras“ von Piano-Paul zur Bildungspolitik am Montagabend mit anschließender Podiumsdiskussion.

Sturm im Champagnerglas

Das Perlenspiel im Champagner sieht nicht nur gut aus. Indem aufsteigende Bläschen die Flüssigkeit durchmischen, setzen sie auch Duftstoffe frei. Zwei Physiker haben sich dieses Phänomen einmal ganz genau angesehen.

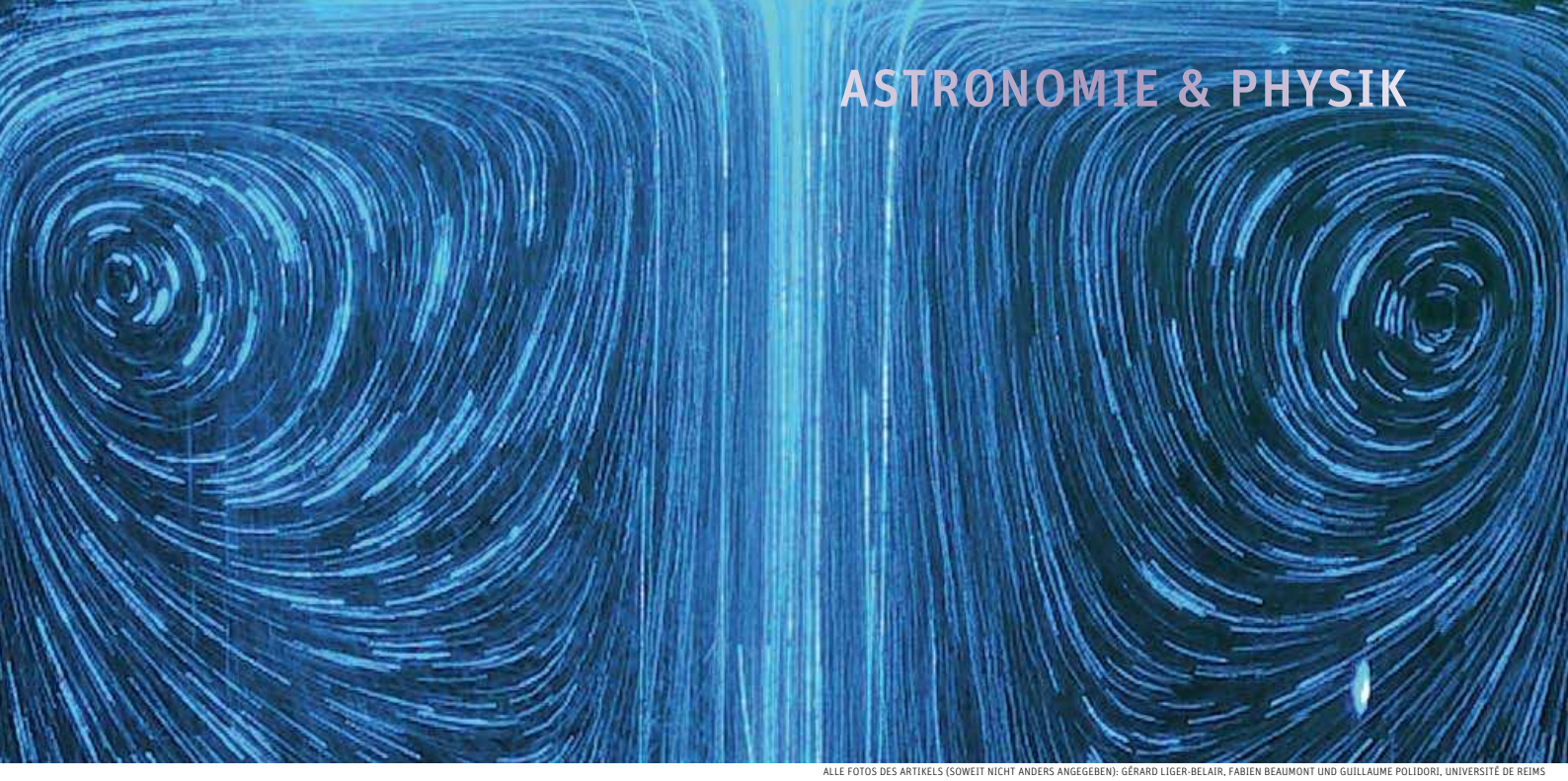
Von Gérard Liger-Belair und Guillaume Polidori

Ob in zierlichen Champagnerflöten oder in breit auslaufenden Schalen: Wenn in edlem französischem Schaumwein perlende Bläschen aufsteigen, wird vor allem der Sehsinn angenehm stimuliert. Für diesen Genuss sind auch wir durchaus empfänglich, hier jedoch wollen wir dieses Phänomen mit einem weniger leidenschaftlichen Blick untersuchen: indem wir nämlich die zahlreichen Parameter untersuchen, die das Verhalten der Champagnerbläschen steuern.

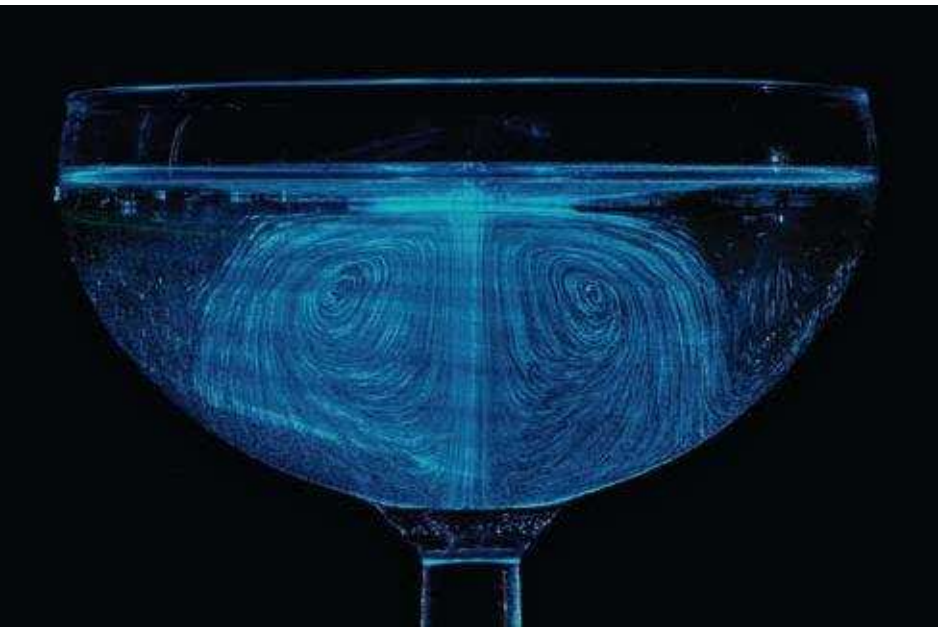
Schon seit einigen Jahren wissen wir, wie die Bläschen an den Wänden eines Champagnerglases oder im Inneren der Flüssigkeit entstehen, davon später. Doch welche Rolle spielen sie? Sind die Gasperlen rein ästhetischer Natur, befördern sie lediglich das subjektive Empfinden? Mitnichten. Bei ihrer Wanderung durch den Champagner versetzen die Bläschen die umgebende Flüssigkeit in eine strukturierte Bewegung. Sie vermischen sie kontinuierlich und haben dadurch wesentlichen Einfluss auf den Geschmack, den wir beim Trinken wahrnehmen. Tatsächlich tragen diese Strömungen erheblich zur Freisetzung des Kohlendioxids an der Flüssigkeitsoberfläche bei. Indem sie dort die aromatischen Moleküle und flüchtigen Geruchsstoffe ständig erneuern, wirken diese Bewegungen aber auch an der Entfaltung der Aromen mit. Fehlt in einem Champagnerglas die Konvektion, verarmt die Oberflächenschicht sehr schnell an flüchtigen Molekülen: Sie verdunsten, ohne dass andere nachgeliefert werden.

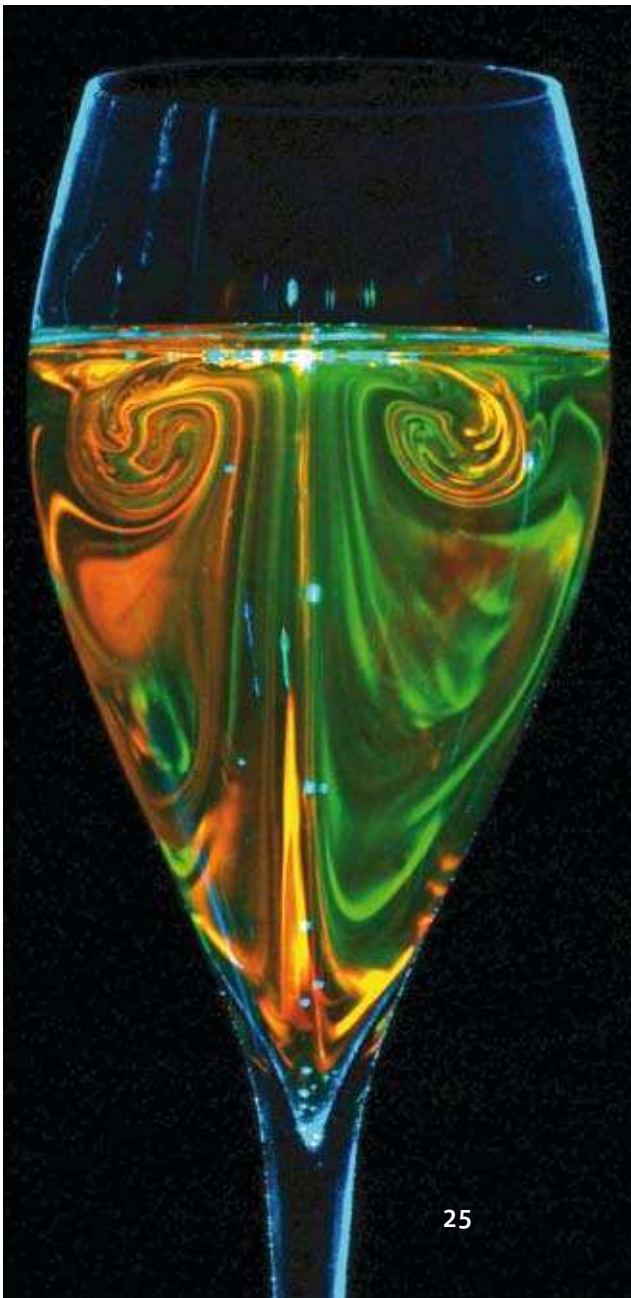
In Kürze

- **Perlender Schaumwein** ist nicht nur ein Genuss fürs Auge. Denn die aufsteigenden Bläschen transportieren auch aromatische Moleküle und flüchtige Geruchsstoffe an die Flüssigkeitsoberfläche.
- Mit einem Laser durchleuchteten die Autoren einen mit reflektierenden Partikeln versetzten Champagner. So machten sie die **Strömungsvorgänge** in dessen Innerem sichtbar.
- Ihr Fazit: **Die Form des Glases** entscheidet über den Genuss beim Trinken. Moussierpunkte im Glas, die das Sprudeln künstlich verstärken, sind aber nicht uneingeschränkt zu empfehlen.

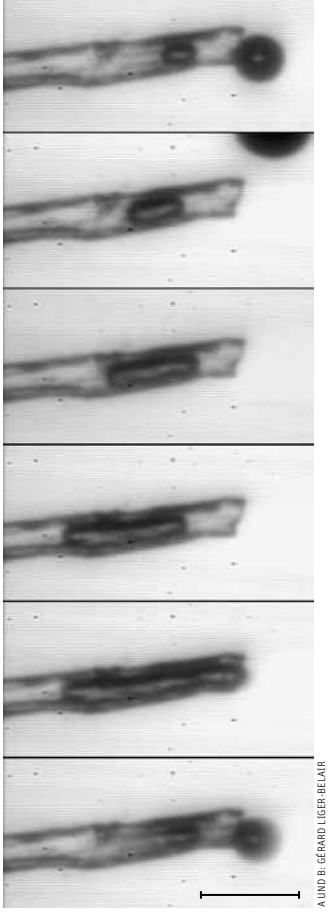


ALLE FOTOS DES ARTIKELS (SOWEIT NICHT ANDERS ANGEGEBEN): GÉRARD LIGER-BELAIR, FABIEN BEAUMONT UND GUILLAUME POLIDORI, UNIVERSITÉ DE REIMS

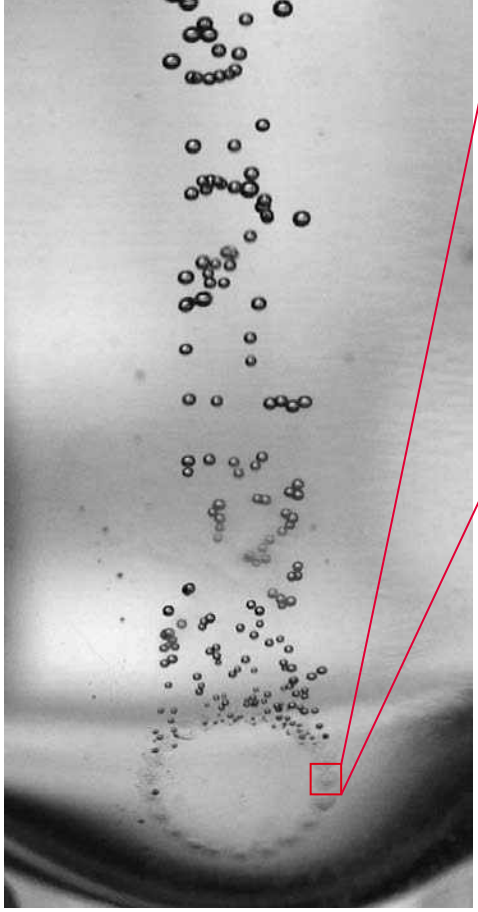




In einem Glas mit Champagner geht es lebhaft zu. Sprudelnde Bläschen bringen die Flüssigkeit in Bewegung und tragen dazu bei, dass deren Aromen an der Oberfläche freigesetzt werden. Die Strömungen lassen sich beobachten, indem man Champagner mit reflektierenden Partikeln versetzt, in ein Glas schenkt und dieses dann mit einem Laser durchleuchtet. Besitzt das Glas einen Moussierpunkt, also eine mikroskopische Aufrauung direkt über dem Stiel, bilden die Blasen eine vertikale Säule, und die Flüssigkeit strömt in einem torusförmigen Wirbelring um die Säule herum. In einer Champagnertulpe (links) ist die gesamte Flüssigkeit in Bewegung, während der Champagner in den Randbereichen einer ausladenden Schale (oben) in Ruhe ist. Das Bild rechts zeigt ein Champagnerglas, wie es zur Verkostung genutzt wird. Hier machten die Autoren die Strömungen mit Hilfe zweier Farbstoffe (orange Sulforhodamin, grün Fluorescein) sichtbar.



A UND B: GÉRARD LIGER-BELAIR



C UND D: LABORATOIRE CREATE, SAINT OMER

Die ersten Mikrobläschen bilden sich an Partikeln, die sich bereits vor dem Einschenken im Glas befanden. Diese Teilchen, beispielsweise Zellulosefasern an der Glaswand (oben), enthalten Gaseinschlüsse, die in dem Maß wachsen, in dem das in der Flüssigkeit gelöste Kohlendioxid hineindiffundiert. Sind sie groß genug, befreien sie sich und steigen auf. Etwa alle 200 Mikrosekunden beginnt der Prozess von Neuem. (Der schwarze Balken steht für eine Strecke von 50 Mikrometern.) Verstärken lässt sich das Sprudeln durch einen Moussierpunkt, eine Aufrauung am Glasboden. Der ringförmige Moussierpunkt im mittleren Bild misst drei Millimeter im Durchmesser. Er besteht aus mikroskopisch kleinen, von einem Laserstrahl erzeugten »Kratern« (rechts).

Wir wollten genauer wissen, welche Folgen das Sprudeln im Champagner für dessen Durchmischung hat. Hier stellen wir die neuesten Ergebnisse vor, die wir bei einer Reihe von Studien erzielten. Die Gesetze der Thermodynamik verbieten es, dass die Bläschen im Champagner (und in allen anderen sprudelnden Getränken) im Inneren der Flüssigkeit spontan, ex nihilo, entstehen. Denn um die Kohäsionskräfte der Flüssigkeit zu überwinden – es handelt sich um anziehende Vander-Waals-Dipolkräfte –, muss Energie aufgebracht werden. Außerdem ist es notwendig, dass der Champagner schon von vornherein kleine Einschlüsse von Gas enthält. Der Krümmungsradius solcher Mikrobläschen muss oberhalb einer kritischen Größe von etwa 0,3 Mikrometern (millionstel Meter) liegen. Dann kann das in der Flüssigkeit gelöste Kohlendioxid in die Bläschen hineindiffundieren und in den gasförmigen Zustand übergehen – sie vergrößern sich. Bei geringeren Größen ist der Druck im Inneren der Mikrobläschen (der sich umgekehrt proportional zum Krümmungsradius verändert) zu hoch und blockiert die Diffusion des Gases.

Woher stammen diese winzigen Gaseinschlüsse? Sie sind in kleinen Partikeln gefangen, meist Mikrozellulosefasern oder Mikrokristallen aus Weinstein, die sich schon vor dem Einschenken im Glas befanden. Heterogene Nukleation ist der Fachbegriff für jene Fälle, in denen in einer mit gelöstem Gas übersättigten Flüssigkeit Bläschen von solchen mikroskopischen Gaskeimen ausgehen (Bild links) – so wie das bei Champagner und anderen Schaumweinen der Fall ist. Die Gaskeime sind unverzichtbar. Um das zu demonstrieren, genügt es, ein Champagnerglas perfekt zu reinigen und anschließend zu füllen. Zuerst entsteht kurzlebiger Schaum, hervorgerufen durch die Verwirbelungen beim Einschenken. Wenig später jedoch gleicht der Champagner einem stillen Weißwein. Wie das Gas an der Oberfläche entweicht, lässt sich dann nicht mehr beobachten.

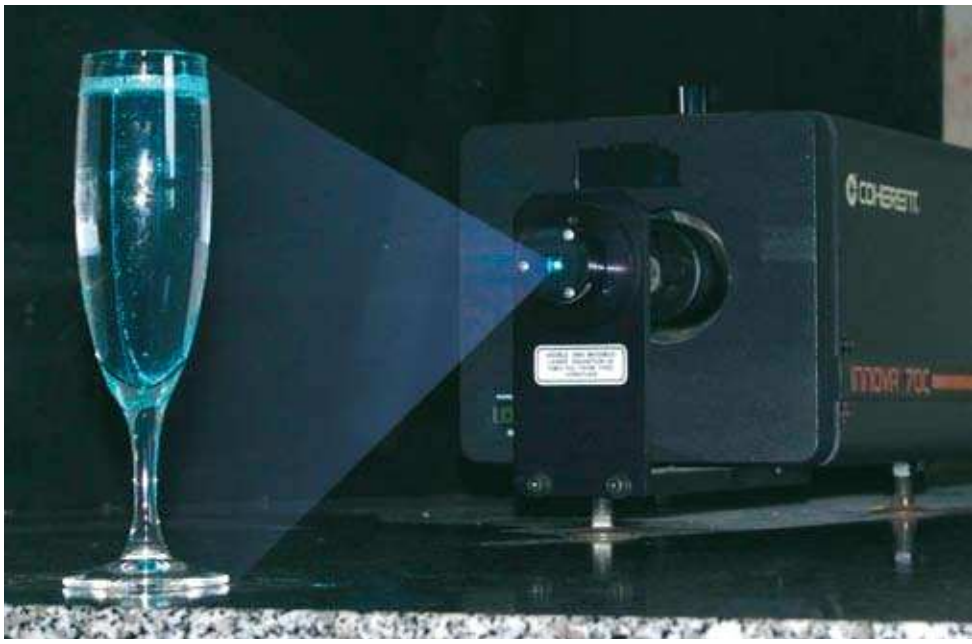
Viele Glashersteller empfehlen heute Gläser mit so genanntem Moussierpunkt, einer kleinen Aufrauung rund um deren tiefste Stelle, die dort eingeätzt oder mit einem Laser erzeugt wird. Solche künstlichen Nukleationsstätten können hilfreich sein. Denn manchmal herrscht Mangel an ihren natürlichen Pendants, beispielsweise wenn Champagnergläser in der Spülmaschine gereinigt und dann kopfüber aufgestellt werden. Die mikroskopisch feine Aufrauung am Glasboden begünstigt die Bildung von Mikrobläschen im Augenblick des Einschenkens und damit die Blasenproduktion. Allerdings gleicht das künstlich erzeugte Sprudeln nicht dem charakteristischen Sprudeln, wie es von Zellulosefasern ausgeht. In einem Champagnerglas mit Moussierpunkt liegen die Nukleationsstätten so nahe beieinander, dass die Bläschen während ihres gesamten Wegs zur Oberfläche miteinander in Wechselwirkung treten (mittleres Bild oben). Das eher chaotische Ergebnis ist für das Auge oft weniger eindrucksvoll.

Tricks aus dem Windkanal

Doch was geschieht mit dem Champagner selbst? Die Bewegung, in die er durch diese Vorgänge versetzt wird, ist für uns normalerweise unsichtbar. Zum Zweck der Visualisierung mussten wir uns also etwas einfallen lassen. Unsere Lösung bestand schließlich in einer Technik, die auch die Luftfahrtindustrie für aerodynamische Untersuchungen nutzt: ein Argonlaser, der einen flächigen Laserstrahl aussendet (Bild rechts oben). Wir richteten den Strahl so aus, dass er das Champagnerglas in seiner Symmetrieebene schnitt. Bevor wir

den Champagner einschenkten, versetzten wir ihn mit kleinsten neutralen Partikeln. Ihr Durchmesser ist von der Größenordnung eines zehntel Millimeters und ihre Dichte vergleichbar mit der Flüssigkeitsdichte. Außerdem beschichteten wir sie mit einer stark reflektierenden Substanz. Trifft sie der Laserstrahl, werfen sie das Licht zurück und werden dadurch sichtbar. Damit können wir die Trajektorien, die Bewegungsbahnen der Teilchen, verfolgen, indem wir das Glas in geeigneten zeitlichen Abständen fotografieren.

Jede Karte oder Tomografie der Teilchentrajektorien liefert gewissermaßen einen digitalen Fingerabdruck. Sie macht die Bedingungen beobachtbar, unter denen das Sprudeln entsteht, ist aber auch für die Form des Champagnerglases charakteristisch und hängt darüber hinaus davon ab, ob das Glas über einen Moussierpunkt verfügt (wie auf den Fotos unten) oder nicht. Solche Tomografien



Die Bewegungen der Champagnerflüssigkeit in einem Glas werden durch den flächigen Strahl eines Argonlasers enthüllt. Er lässt reflektierende Partikel in der Flüssigkeit aufleuchten.

Die Strömungen in Champagnergläsern unterscheiden sich abhängig davon, ob das Sprudeln auf natürlichem Weg zu Stande kommt (a) oder von einem Moussierpunkt hervorgerufen wird (b, in diesem Fall ist er ringförmig und befindet sich direkt über dem Stiel). Bild (c) zeigt dasselbe Glas wie (b) 20 Minuten nach dem Einschenken. Das Sprudeln hat bereits stark nachgelassen.

Die Blasen, die an der Oberfläche zerplatzen, lassen winzige Flüssigkeitsstrahlen in die Höhe schießen (nebenstehendes Bild), die schnell in feine Tröpfchen zerstieben und einen Nebel bilden, den wir durch die Lasertomografie sichtbar machen können (Bild rechte Seite).

GÉRARD LIGER-BELAIR

sind daher sehr aufschlussreich. In einem Glas ohne Moussierpunkt kommt das Sprudeln auf natürliche Weise zu Stande. Hier wird der Champagner durch Wirbel in Bewegungen versetzt, die die Flüssigkeit eher langsam und auf homogene Weise vermischen. Moussierpunkte hingegen verändern den Mischprozess. In den Gläsern, die wir mit Hilfe von Denis Lalart von ARC International (das französische Unternehmen wirbt für sich als Weltmarktführer für Tischkultur; die Redaktion) untersuchten, besteht die in der Laserebene beobachtbare Hauptströmung aus zwei symmetrischen Ringen von Wirbeln. Sie entstehen beiderseits der zentralen Bläschensäule, die durch den Moussierpunkt erzeugt wird.

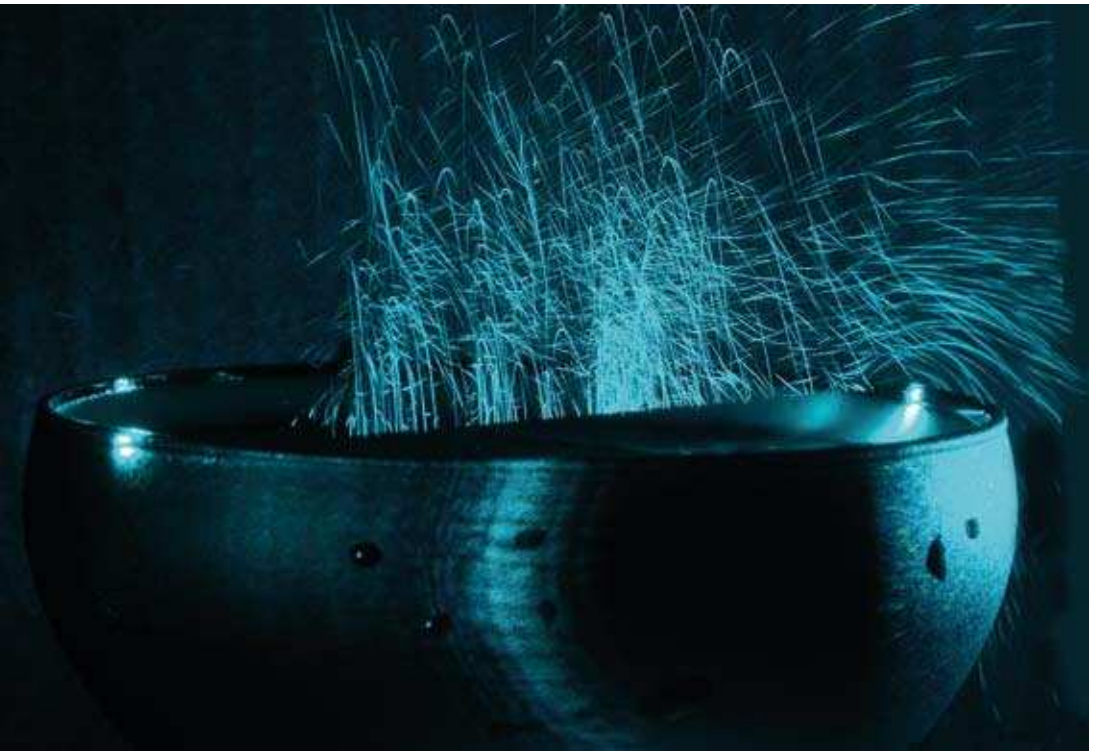
Da sich der Moussierpunkt auf dem Boden des Glases in dessen Symmetrieachse befindet, gleicht die Strömung des Champagners einer Art deformiertem Torus, durch dessen Zentrum die Achse des Glases verläuft. Auch in diesem Fall wird die Flüssigkeit auf homogene Weise vermischt, doch sind nun die Geschwindigkeiten der Konvektionsströmungen höher. Die Strömungsgeschwindigkeiten in einer an Kohlendioxid übersättigten Flüssigkeit stehen aber in enger Beziehung mit der Diffusionsgeschwindigkeit des Gases an der Oberfläche. Daher gibt der Champagner das Kohlendioxid und die flüchtigen aromatischen Moleküle in einem Glas mit Moussierpunkt schneller ab, als wenn dieser fehlt – er kann das Gas und seine feinen Aromen vorzeitig verlieren. Außerdem beeinträchtigt Kohlendioxid, wenn es im Übermaß abgegeben wird, auch das Geruchserlebnis. Daher müssen Hersteller von Gläsern mit Moussierpunkt darauf achten, dass der Champagner durch unangemessen starkes Perlen nicht zu früh Geschmack einbüßt.

Champagner in einem Glas mit Moussierpunkt kann seine feinen Aromen vorzeitig verlieren

Farben für die Tulpe

Um unsere Untersuchung zu vervollständigen, visualisierten wir die Strömung des Champagners in einer Standardtulpe, wie sie für Degustationen verwendet wird. Sie verfügt über einen Moussierpunkt direkt auf dem Glasboden über dem Stiel. Wir platzierten einen Tropfen Farbstoff neben der zentralen Bläschensäule und einen weiteren Tropfen eines anderen Farbstoffs direkt gegenüber. In der Schnittebene ließen sich nun zwei Bereiche unterscheiden. Die im Laserlicht fluoreszierenden Farbstoffe zeichneten exakt die Bewegung des Champagners nach, wie sie von der zentralen Bläschensäule angetrieben wurde (Bild S. 25 unten).

Wir gehen davon aus, dass die Struktur der Wirbel in einem Glas Champagner ein Parameter ist, der bei genauer Analyse des Vermischungsprozesses (im Inneren der Flüssigkeit ebenso wie an deren Oberfläche) und der Freisetzung flüchtiger Geruchsmoleküle berücksichtigt werden muss. Um diese Hypothese zu überprüfen, interessierten wir uns für die auftretenden Unterschiede, wenn der gleiche Champagner in eine Schale oder in eine



Tulpe eingeschenkt wird, wobei beide Versuchsgläser über identische Moussierpunkte verfügten (Fotos auf S. 24 und 25). Die tomografischen Aufnahmen enthüllen, dass in der breit ausladenden Schale nur der zentrale Bereich zur Vermischung des Champagners beiträgt. Angetrieben durch das vom Moussierpunkt ausgehende Sprudeln umströmt die Flüssigkeit die Symmetrieachse der Schale in torusförmigen Wirbeln. Die große Öffnung der Schale verhindert aber, dass sich die Flüssigkeit auch jenseits des zentralen Bereichs vermischt. In größerer Entfernung von der Mitte konnten wir praktisch keine Strömungen mehr feststellen, das heißt, dass an den entsprechenden Oberflächenbereichen weniger Aromen und Kohlendioxid abgegeben werden. In der Tulpe hingegen durchmischt sich das gesamte Flüssigkeitsvolumen, weil der Wirbeltorus das ganze Sektglas einnimmt. So werden die aromatischen Moleküle leichter an der Oberfläche freigesetzt.

Die Form des Behältnisses nimmt also entscheidenden Einfluss – ebenso aber die Intensität des Sprudelns. Vom Zeitpunkt des Einschenkens an nimmt diese Intensität immer mehr ab, da der Champagner kontinuierlich Kohlendioxid verliert. Die Blasen vergrößern sich zwar weiterhin und werden nach oben beschleunigt, aber ihre kinetische Energie sinkt allmählich. Dadurch ändern sich auch die Strömungsverhältnisse. Etwa 20 Minuten nach dem Einschenken kann das Sprudeln in einer Tulpe mit Moussierpunkt das Flüssigkeitsvolumen nicht mehr so stark in Bewegung versetzen (Bilder S. 27 unten, Mitte und rechts): Der torusförmige Wirbelring dicht unter der Oberfläche ist zwar noch immer vorhanden, aber einige Zentimeter tiefer herrscht dann Ruhe. Etwa die Hälfte des Flüssigkeitsvolumens ist von der Grenzfläche zur Luft sozusagen abgeschnitten und nimmt nicht mehr effektiv am Gastransport teil.

Die an der Oberfläche zerplatzenden Bläschen tragen ebenfalls zur Freisetzung der Aromen bei. Ist der Champagner frisch eingeschenkt, treffen pro Sekunde Hunderte von Bläschen auf die Oberfläche. Dort zerplatzen sie und lassen dadurch feine Wasserstrahlen in die Höhe schießen, die gleich darauf in kleine Tröpfchen zerstieben. Diese unzähligen Tröpfchen bilden über dem Champagner einen regelrechten Nebel, der Anteil an der Verdunstung des Champagners und der Freisetzung seiner Aromen hat (Bilder oben).

Unsere Ergebnisse zeigen es: Die Visualisierung mittels Lasertomografie erweist sich als wertvolles Werkzeug für die weinkundliche Untersuchung von Champagner und anderen Schaumweinen. Denn die Wirbelstruktur eines Champagners, die wir hier zum ersten Mal sichtbar machten, ist tatsächlich ein wesentlicher Parameter seines dynamischen Verhaltens. Dieses Verhalten werden wir dank des neuen Werkzeugs nun immer besser verstehen – und genau das wird man den Champagnergläsern von morgen auch ansehen können. ◁

Gérard Liger-Belair (links) ist Professor für Physik im Labor für Weinkunde der französischen Université de Reims. **Guillaume Polidori** ist Professor für Fluidmechanik im Labor für Thermomechanik, ebenfalls an der Université de Reims.

Liger-Belair, G. et al.: Visualization of Mixing Flow Phenomena in Champagne Glasses under Various Glass-Shape and Engravement Conditions. In: Journal of Agriculture and Food Chemistry 55, S. 882 – 888, 2007.

Liger-Belair, G.: Effervescence! La Science du Champagne. Odile Jacob, Paris 2006.

Liger-Belair, G.: Der Charme des Champagners. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2003, S. 52.

Liger-Belair, G., Jeandet, P.: Effervescence in a Glass of Champagne: A Bubble Story. In: Europhysics News 33(1), S. 10 – 14, 2002.

Zarifian, E. et al.: Bulle de Champagne. Perrin, Paris 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965706.

Da Sterne vom M-Typ (Rote Zwerge) lichtschwach sind, müsste ein erdähnlicher Planet fast schwarze Pflanzen tragen, um alles verfügbare Licht zu absorbieren.

Junge M-Sterne neigen zu Ausbrüchen ultravioletter Strahlung, vor denen Organismen nur unter Wasser geschützt sind.

Fotosynthese UNTER FREMDEN STERNEN

Auf fremden Planeten würden wir wohl vergeblich nach grüner Flora suchen. Oft vermag rote, blaue oder gar schwarze Vegetation das exotische Licht anderer Sonnen besser zu nutzen.

Von Nancy Y. Kiang

Die Entdeckung außerirdischen Lebens ist nicht mehr bloß Stoff für Sciencefiction-Romane und Ufo-Jäger. Statt darauf zu warten, dass Außerirdische zu uns kommen, versuchen wir sie in ihrer Heimat aufzuspüren. Da es sich nicht um hoch technisierte Zivilisationen handeln muss, halten wir nach so genannten Biosignaturen Ausschau – nach physikalisch-chemischen Anzeichen für grundlegende Lebensvorgänge. Die Astronomen haben jenseits des Sonnensystems bereits mehr als 200 Welten entdeckt, die um fremde Sterne kreisen. Zwar haben wir noch nicht herausgefunden, ob diese extrasolaren Planeten Leben beherbergen, aber das ist nur eine Frage der Zeit. Im Juli 2007 wiesen Astronomen auf einem dieser Planeten Wasserdampf nach, indem sie das Sternenlicht analysierten, das seine Atmosphäre passiert hatte. Mehrere Weltraumorganisationen entwickeln derzeit Teleskope, um die Strahlungsspektren erdähnlicher Planeten auf Lebensspuren zu untersuchen.

Besonders auffällige Biosignaturen werden durch Fotosynthese erzeugt. Auf der Erde ist dieser Prozess so erfolgreich, dass er die Grundlage für nahezu alles Leben darstellt. Zwar leben ein paar Organismen von der Wärme und dem Methan aus ozeanischen Hydrothermalquellen, aber die reichhaltigen Ökosysteme an der Erdoberfläche sind allesamt auf Sonnenlicht angewiesen.

Die Fotosynthese bringt zwei Typen von Biosignaturen hervor: zum einen biogene Gase in der Atmosphäre – insbesondere Sauerstoff und sein Reaktionsprodukt Ozon –, zum anderen Oberflächenfarben, die spezialisierte Pigmente anzeigen, vor allem grünes Chlorophyll. Die Idee, nach solchen Pigmenten Ausschau zu halten, ist nicht neu. Vor einem Jahrhundert versuchten einige Astronomen, die jahreszeitliche Verdunklung des Mars als Vegetationszyklus zu deuten. Sie analysierten das von der Marsoberfläche reflektierte Licht auf Indizien für Grünpflanzen. Der britische Schriftsteller H. G. Wells erkannte gleich ein Manko dieses Ansatzes und entwarf in seinem »Krieg der Welten« ein Gegenszenario: »Offenbar ist das Pflanzenreich auf dem Mars nicht vorwiegend grün, sondern stark blutrot gefärbt.« Heute wissen wir, dass es auf der Marsoberfläche keine Vegetation gibt; die periodische Eintrübung kommt durch Staubstürme zu Stande. Doch mit der Idee, dass die fotosynthetischen Lebensformen auf einem anderen Planeten nicht grün sein müssen, hatte Wells durchaus Recht.

Schon die Erde beherbergt nicht nur Grünpflanzen. Manche Landpflanzen tragen rote Blätter, und Algen sowie fotosynthetische Bakterien gibt es in fast allen Farben des Regenbogens. Purpurbakterien absorbieren nicht nur sichtbares Licht, sondern auch solares Infrarot. Welche Farbe wird auf einem fremden Planeten vorherrschen? Und wie sollen wir daran Lebensformen erkennen? Die Antwort hängt davon ab, wie die Fotosynthese sich dort an ein Tageslicht angepasst hat, das von einem nicht unbedingt sonnenähnlichen Zentralgestirn ausgeht und durch eine unirdische Atmosphäre gefiltert wird.

Warum sind unsere Pflanzen grün?

Um herauszufinden, wie Fotosynthese auf einem anderen Planeten funktionieren mag, muss man sie zunächst daheim verstehen. Das Energiespektrum des Sonnenlichts an der Erdoberfläche hat sein Maximum im blaugrünen Bereich. Die Forscher haben sich lange den Kopf darüber zerbrochen, warum Pflanzen ausgerechnet grünes Licht reflektieren und somit den vermeintlich ergiebigsten Teil des Spektrums gar nicht nutzen. Des Rätsels Lösung: Fotosynthese hängt nicht von der Gesamtmenge der Lichtenergie ab, sondern von der Energie pro Photon und der Anzahl der Photonen, aus denen das Licht besteht.

Unsere Sonne ist ein G-Stern.

Ein F-Stern würde den Pflanzen zu viel Licht spenden; sie müssten daher das meiste reflektieren.

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: KENN BROWN & CHRIS WREN, MONOLITHIC STUDIOS

Geschichte der irdischen Fotosynthese

Die Fotosynthese hat sich in der Erdgeschichte früh und zügig entwickelt. Demnach ist sie wohl kein einmaliger Glücksfall, sondern kann auch auf anderen Welten entstehen. Als die Organismen im Lauf der Zeit Gase freisetzten, welche die für sie lebenswichtigen Lichtverhältnisse veränderten, mussten sie neue Farben entwickeln.

▼ Entstehung der Erde

älteste Fossilienbelege für Luftsauerstoff vor 2,4 bis 2,3 Milliarden Jahren (abgekürzt GJ für Gigajahre) ▼

vor 4,6 Mrd. Jahren (GJ) | 4 GJ | 3,4 GJ ▲ | 3 GJ | 2,7 GJ ▲ | 2 GJ

Erste fotosynthetische Bakterien
Sie absorbierten nahes Infrarot statt sichtbaren Lichts und produzierten Schwefel- oder Sulfatverbindungen statt Sauerstoff. Ihre Pigmente waren Vorläufer des Chlorophylls.

Cyanobakterien
Diese allgegenwärtigen Bakterien waren die ersten Sauerstoffproduzenten. Sie absorbieren sichtbares Licht mittels einer Pigmentmischung: Phycobiline, Carotinoide und mehrere Formen von Chlorophyll.

Rot- und Braunalgen
Diese Organismen haben komplexere Zellstrukturen als Bakterien. Wie die Cyanobakterien enthalten sie sowohl Carotinoidpigmente als auch mehrere Formen von Chlorophyll.

Grünalgen
Grünalgen gedeihen im starken Licht knapp unter Wasser besser als Rot- oder Braunalgen. Sie kommen ohne Carotinoide aus.

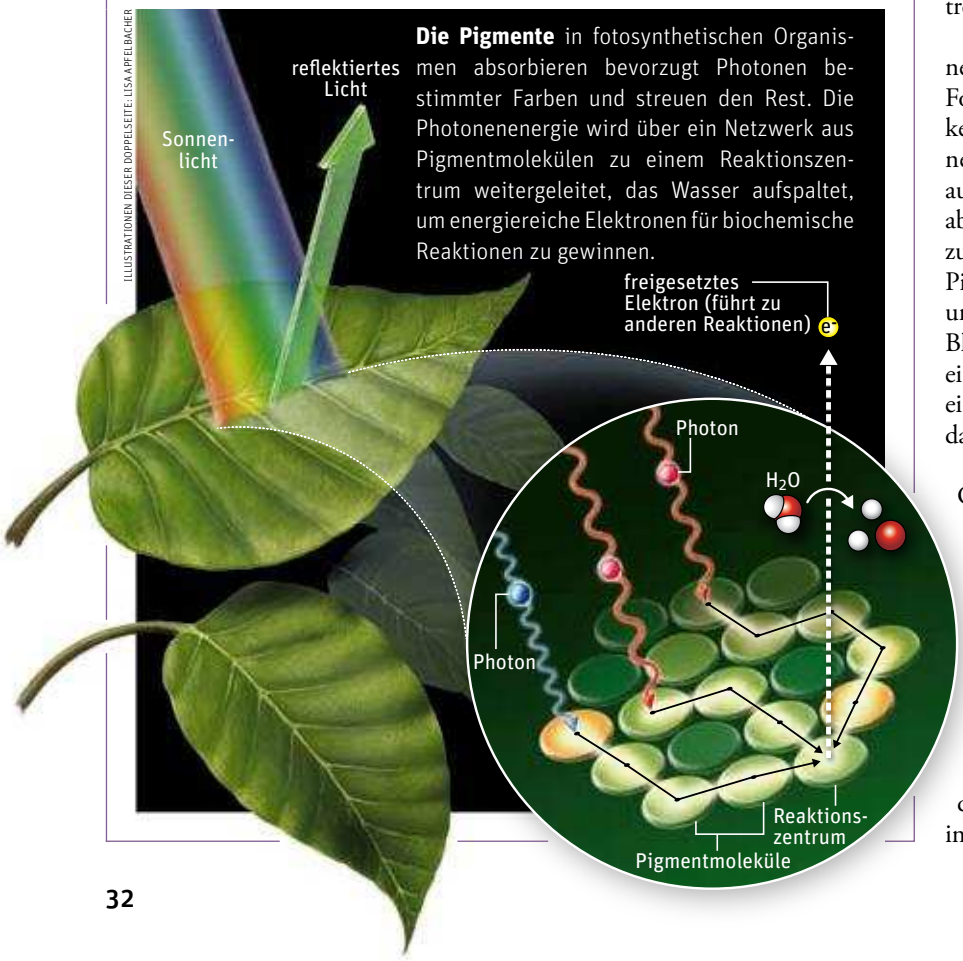
Zwar haben blaue Photonen – so wollen wir salopp die Lichtquanten im blauen Frequenzbereich nennen – höhere Energie als rote, aber die Sonne emittiert mehr von der roten Sorte. Pflanzen nutzen blaue Photonen wegen ihrer Energie und rote wegen ihrer Menge. Die grünen Photonen liegen dazwischen und zeichnen sich durch keinen der beiden Vorteile aus. Darum haben sich die Pflanzen daran angepasst, sie kaum zu absorbieren. Beim grundlegenden Fotosynthesevorgang wird aus Kohlendioxid ein Kohlenstoffatom (CO_2) abgespaltet und in einem einfachen Zuckermolekül fixiert. Dafür werden mindestens acht Photonen gebraucht. Ein Photon ist nötig, um eine Sauerstoff-Wasserstoff-Bindung in einem Wassermolekül (H_2O) zu lösen und damit ein Elektron für biochemische Reaktionen zu gewinnen.

Insgesamt müssen vier solche Bindungen getrennt werden, um ein Sauerstoffmolekül (O_2) zu bilden. Für jedes dieser Photonen wird mindestens noch ein weiteres benötigt, damit in einer zweiten Reaktion der Zucker entsteht. Jedes Photon muss ein Mindestmaß an Energie haben, um die Reaktionen anzutreiben.

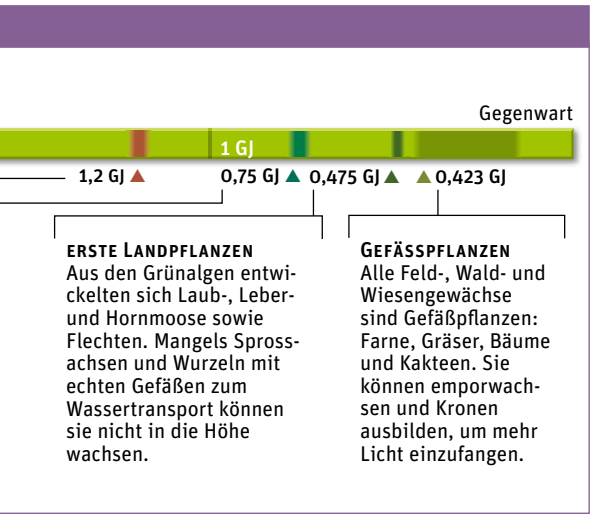
Die Art und Weise, in der Pflanzen Sonnenlicht nutzen, ist ein wahres Naturwunder. Fotosynthesepigmente wie Chlorophyll sind keine isolierten Moleküle. Sie arbeiten vernetzt wie verschaltete Antennen, deren jede auf Photonen einer bestimmten Wellenlänge abgestimmt ist. Chlorophyll absorbiert bevorzugt rotes und blaues Licht. Carotinoide – die Pigmente, die das Herbstlaub leuchtend rot und gelb färben – sind auf ein etwas anderes Blau spezialisiert. All diese Energie wird zu einem speziellen Chlorophyllmolekül in einem chemischen Reaktionszentrum geleitet, das Wasser spaltet und Sauerstoff freisetzt.

Dieser Energietransfer ist der Schlüssel zur Gesamtfarbe der Pflanzen. Der Molekülkomplex im Reaktionszentrum vermag nur dann chemische Reaktionen auszuführen, wenn er ein rotes Photon oder eine gleichwertige Energiemenge in anderer Form empfängt. Um blaue Photonen zu nutzen, wandeln die Antennenpigmente gemeinsam die hohe Energie der blauen Photonen in niedrigere um – ähnlich wie eine Reihe von Transformatoren, welche die Hochspannung der Überlandleitungen in die 220 Volt aus der Steckdose übersetzt.

Wie funktioniert Fotosynthese?



Die Pigmente in fotosynthetischen Organismen absorbieren bevorzugt Photonen bestimmter Farben und streuen den Rest. Die Photonenenergie wird über ein Netzwerk aus Pigmentmolekülen zu einem Reaktionszentrum weitergeleitet, das Wasser aufspaltet, um energiereiche Elektronen für biochemische Reaktionen zu gewinnen.



Der Vorgang beginnt, wenn ein blaues Photon auf ein Blau absorbierendes Pigment trifft und eines der Elektronen im Molekül auf ein höheres Energieniveau hebt. Wenn das Elektron in seinen Grundzustand zurückfällt, setzt es Energie frei – aber auf Grund von Wärme- und Schwingungsverlusten etwas weniger, als es absorbiert hat.

Das Pigmentmolekül gibt seine Energie nicht in Form eines weiteren Photons ab, sondern als elektrische Wechselwirkung mit einem anderen Pigmentmolekül, das Energie auf diesem niedrigeren Niveau zu absorbieren vermag. Dieses Pigment wiederum setzt eine noch geringere Energiemenge frei, und so setzt sich der Prozess fort, bis von dem ursprünglichen blauen Photon nur noch die Energie eines roten Photons übrig ist. Ebenso kann der Pigmentkomplex auch Türkis, Grün oder Gelb in Rot umwandeln. Das Reaktionszentrum am Ende der Kaskade ist daran angepasst, Photonen möglichst niedriger Energie zu absorbieren. Auf der Oberfläche unseres Planeten sind die roten Photonen sowohl die häufigsten als auch die energieärmsten im sichtbaren Spektrum.

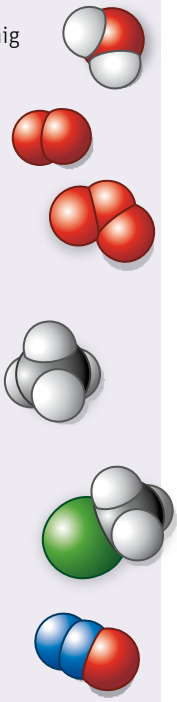
Unter Wasser stehen den fotosynthetischen Organismen nicht unbedingt vor allem rote Photonen zur Verfügung. Das Licht ändert sich mit der Tiefe, weil es durch Wasser, gelöste Stoffe und andere Lebewesen getrübt wird. Das hat eine deutliche Schichtung der Lebensformen gemäß ihrer Pigmentmischung zur Folge. Die tieferen Organismen sind daran angepasst, die Farben zu absorbieren, die durch die höheren Schichten bis zu ihnen durchdringen. Beispielsweise enthalten Algen und Cyanobakterien so genannte Carotinoide, die grüne und gelbe Photonen nutzen. Hingegen haben anoxygene Bakterien – sol-

In Kürze

- **Verfärbungen auf fernen Planeten** können uns verraten, dass auf einem Planeten Leben existiert.
- Fotosynthese ist an das **Strahlungsspektrum** angepasst, das die Pflanzen erreicht – das Emissionsspektrum des Zentralgestirns, gefiltert durch die Planetenatmosphäre.
- Licht vom tiefen Violett bis zum nahen Infrarot vermag **Fotosynthese** anzutreiben. Ist das Zentralgestirn heißer und blauer als die Sonne, absorbieren Pflanzen vorzugsweise blaues Licht und sehen grün, gelb oder rot aus. Bei kühleren Roten Zwergen absorbieren die Pflanzen möglichst viel Licht und wirken fast schwarz.

Biosignaturen

Neben den von Pflanzen reflektierten Farben können folgende Substanzen auf Leben hinweisen:



➤ **Sauerstoff (O_2) plus Wasser (H_2O).** Auch die Atmosphäre eines unbelebten Planeten enthält ein wenig Sauerstoff, da das Licht des Zentralgestirns Wasserdampf aufspaltet. Doch Regen und die Oxidation von Gesteinen und Vulkangasen entfernen ihn rasch wieder. Darum muss es, wenn ein Planet mit flüssigem Wasser viel Sauerstoff enthält, eine zusätzliche Quelle für das Gas geben. Oxygene Fotosynthese ist dafür der beste Kandidat.

➤ **Ozon (O_3).** In der irdischen Stratosphäre zerlegt die Strahlung Sauerstoff, der dann Ozon bildet. Gemeinsam mit flüssigem Wasser ist Ozon eine starke Biosignatur. Während Sauerstoff im sichtbaren Spektrum nachweisbar ist, kann Ozon im Infrarotbereich entdeckt werden, den manche Teleskope besser erfassen.

➤ **Methan (CH_4) plus Sauerstoff oder jahreszeitliche Schwankungen.** Die brisante chemische Kombination Sauerstoff und Methan kann ohne Fotosynthese kaum entstehen. Auch eine im Jahresverlauf schwankende Methankonzentration deutet auf Leben hin. Auf einem unbelebten Planeten bleibt der Methangehalt ziemlich konstant und sinkt langfristig, weil die Strahlung des Sterns die Moleküle aufspaltet.

➤ **Methylchlorid (CH_3Cl).** Auf der Erde entsteht dieses Gas bei der Verbrennung von Pflanzen – vor allem bei Waldbränden – und durch die Einwirkung des Sonnenlichts auf Plankton und Chlor im Meerwasser. Oxidation zerstört es. Durch die relativ schwache Strahlung eines M-Sterns könnte sein Gehalt über die Nachweisgrenze steigen.

➤ **Lachgas (N_2O).** Wenn pflanzliche Biomasse verrottet, setzt sie Stickstoff in Form von Lachgas frei. Abiotische Quellen für dieses Gas, zum Beispiel Blitze, fallen kaum ins Gewicht.

Gefiltertes Sternenlicht

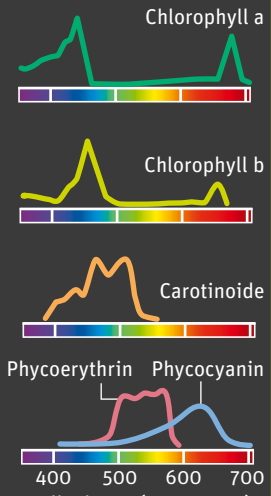
Die Farbe von Pflanzen hängt vom Spektrum des Sternenlichts ab, das Astronomen gut beobachten können, sowie von der Filterung des Lichts durch Luft und Wasser. Dies haben die Autorin und ihre Kollegen simuliert, wobei sie von der mutmaßlichen Zusammensetzung der Atmosphäre und dem Einfluss der Lebensformen ausgingen.

Sterntyp: M (reif)
Masse*: 0,2
Leuchtkraft*: 0,0044
Lebensdauer: 500 Milliarden Jahre
Umlaufbahn des Modellplaneten: 0,07 Astronomische Einheiten
* relativ zur Sonne

Sterntyp: M (jung)
Masse*: 0,5
Leuchtkraft*: 0,023
Lebensdauer: Flare-Phase: 1 Milliarde Jahre; insgesamt: 200 Milliarden Jahre
Umlaufbahn des Modellplaneten: 0,16 Astronomische Einheiten

Fotosynthesepigmente absorbieren unterschiedliche Wellenlängen. Alle Landpflanzen verwenden Chlorophyll a und b sowie eine Mischung aus mehreren Carotinoiden. Algen und Cyanobakterien nutzen auch Phycobiline.

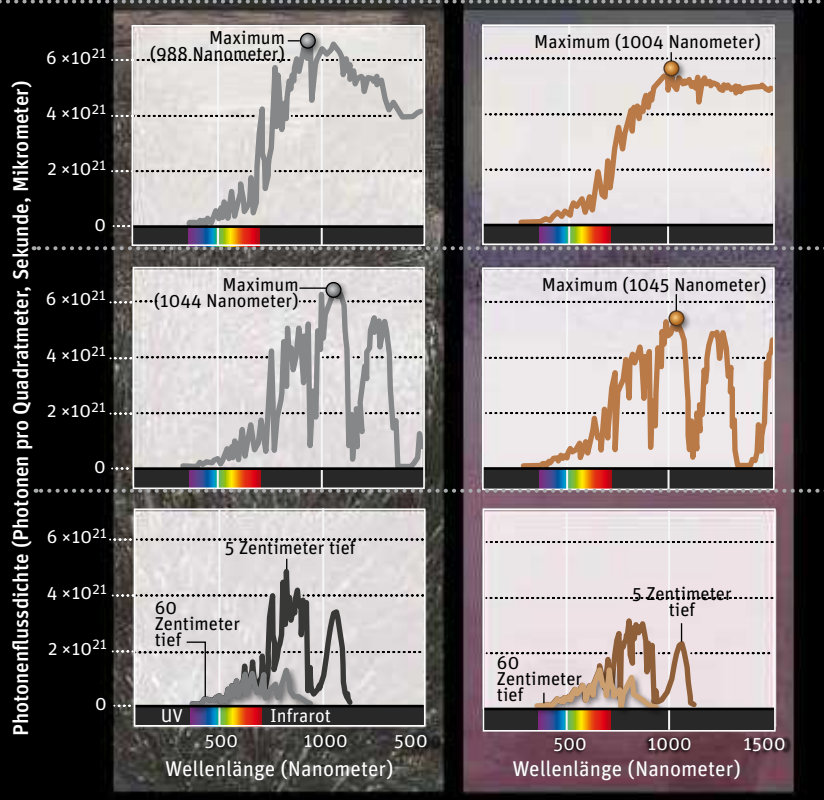
Relative Absorption



Sternenlicht
Vor Eintritt in die Atmosphäre hat das Licht ein charakteristisches Spektrum, dessen Form durch die Oberflächentemperatur des Sterns geprägt ist. Absorption in der Sternatmosphäre selbst erzeugt einige Kerben.

Oberfläche
Atmosphärische Gase absorbieren das Sternenlicht ungleichmäßig, verschieben das Maximum und erzeugen Absorptionsbanden. Am genauesten sind die Banden der Erde mit ihrem G-Stern bekannt.

Unter Wasser
Wasser absorbiert Rot und Infrarot stärker als Blau. Die Kurven zeigen das Spektrum in fünf und in 60 Zentimeter Wassertiefe. Für den Fall des reifen M-Sterns wird eine sauerstoffarme Atmosphäre angenommen.



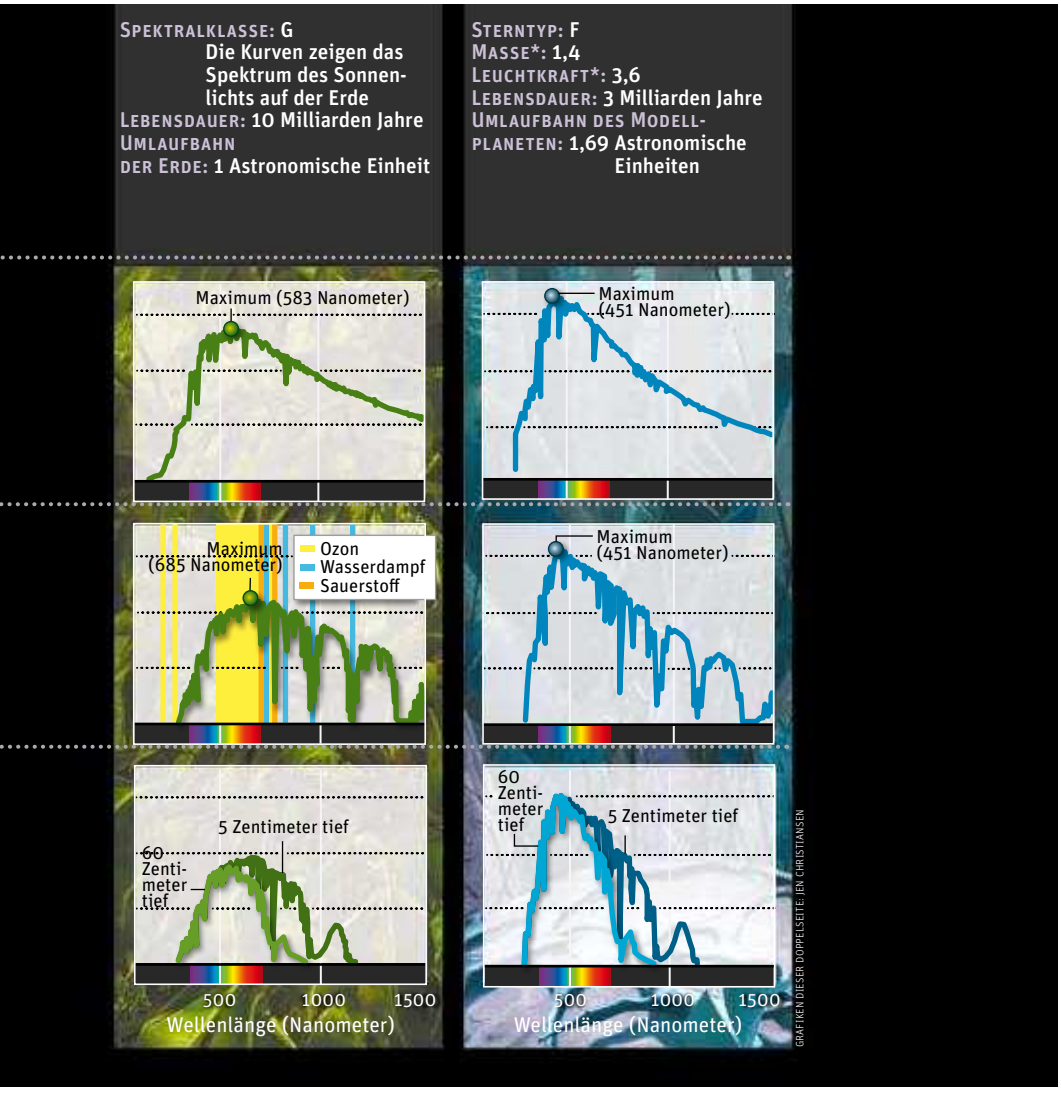
Die veränderliche Oberflächenfarbe eines Planeten erweist sich vielleicht als Lebenszeichen pflanzlicher Organismen

che, die keinen Sauerstoff produzieren – spezielle Chlorophyllsorten, die am langwelligen Rand des sichtbaren Bereichs dunkles Rot und nahes Infrarot absorbieren, denn das ist alles, was bis in die dunklen Tiefen gelangt.

An schwaches Licht angepasste Lebensformen wachsen in der Regel langsamer, weil sie mehr Aufwand treiben müssen, um die karge Strahlung zu nutzen. Hingegen wäre es an der lichtreichen Erdoberfläche für Pflanzen unnötiger Aufwand, zusätzliche Pigmente herzustellen, und folglich nutzen sie nur wenige Farben. Ebenso würde sich der Selektionsdruck auf fremden Planeten auswirken.

Genau wie Wasserlebewesen an das durch Wasser gefilterte Licht angepasst sind, haben sich Landbewohner auf dessen Filterung durch die Gase der Atmosphäre eingestellt. Am oberen Rand der Lufthülle sind gelbe Photonen mit 560 bis 590 Nanometer (millionstel Millimeter) Wellenlänge am häufigsten; mit größeren Wellenlängen sinkt die Photonenanzahl allmählich, zu kürzeren fällt sie steil ab. Beim Durchgang durch die obere Atmosphäre absorbiert Wasserdampf mehrere Infrarotbanden mit Wellenlängen oberhalb 700 Nanometer. Sauerstoff erzeugt Absorptionslinien bei 687 und 761 Nanometer. Das Ozon (O_3) der Stratosphäre absorbiert bekanntlich ultraviolette (UV-)Strahlung besonders stark – sowie sichtbares Licht, wenn auch nur schwach.

Alles in allem lässt unsere Atmosphäre nur charakteristische Strahlungsfenster offen, durch die ein Teil des Spektrums bis zur Erdoberfläche gelangen kann. Das Fenster im sichtbaren Bereich ist an seinem blauen Ende einerseits von vornherein begrenzt durch die zu kürzeren Wellenlängen steil abfallende Intensität der von der Sonne emittierten Photonen, andererseits durch das UV absorbierende Ozon.



Das rote Ende wird durch die Sauerstoff-Absorptionslinien markiert. Wegen der breiten Absorptionswirkung des Ozons im sichtbaren Bereich verschiebt sich das Maximum der Photonenhäufigkeit von Gelb zu Rot – rund 685 Nanometer.

Pflanzen sind an dieses überwiegend durch Sauerstoff geprägte Spektrum angepasst – doch sie haben den Sauerstoff überhaupt erst in die Atmosphäre gebracht! Als die ersten fotosynthetischen Organismen auf der Erde auftauchten, war die Atmosphäre noch sauerstofffrei; also müssen sie an Stelle von Chlorophyll andere Pigmente verwendet haben. Erst als die Fotosynthese mit der Zeit die Luftzusammensetzung veränderte, avancierte Chlorophyll zum optimalen Pigment.

Die frühesten sicheren Belege für Fotosynthese sind etwa 3,4 Milliarden Jahre alt; vage Indizien finden sich in noch älteren Fossilien. Die Entwicklung muss unter Wasser begonnen haben: Wasser ist nicht nur ein gutes Lösungsmittel für biochemische Reaktionen, sondern schützt auch vor der UV-Strahlung der Sonne. Dieser Schutz war unentbehrlich, solange es noch keine atmosphärische Ozonschicht gab. Die erste Fotosynthese wurde von Unterwasserbakterien praktiziert, die infrarote Photonen absorbierten. An diesen chemischen Reaktionen waren Wasserstoff, Schwefelwasserstoff oder Eisen beteiligt, aber kein Wasser; darum setzten sie kein Sauerstoffgas frei. Die Sauerstoff produzierende – oxygene – Fotosynthese begann vor 2,7 Milliarden Jahren durch im Meer lebende Cyanobakterien. Langsam nahmen der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre und die Ozonschicht zu, wodurch Rot- und Braunalgen entstehen konnten. Als auch seichte Gewässer vor UV-Strahlung sicher wurden, entwickelten sich Grünalgen.

GIBT ES LEBEN AUF DER ERDE?

Diese scheinbar seltsame Frage untersuchte ein Team um den Exobiologen und prominenten Sachbuchautor Carl Sagan (1934 – 1996), nachdem die Galileo-Raumsonde auf ihrer Reise durch das Sonnensystem im Dezember 1990 die Erde passiert hatte (Nature 365, S. 715, 1993). Zeigten die dabei von Galileo gesammelten Messdaten irdisches Leben an? Sagan fand drei Indizien für biologische Prozesse erfüllt:

- große Mengen gasförmigen **Sauerstoffs**,
- ein weithin verbreitetes **Oberflächenpigment**, das bevorzugt den roten Anteil des sichtbaren Spektrums absorbiert, und
- viel mehr **Methan** in der Atmosphäre, als es nach den Regeln der anorganischen Chemie geben dürfte.

Sie enthalten keine Carotinoide und sind besser an das helle Licht in Oberflächengewässern angepasst. Aus den Grünalgen gingen schließlich die ersten Landpflanzen hervor – zwei Milliarden Jahre nach dem Beginn der Sauerstoffanreicherung in der Atmosphäre.

Und dann explodierte die Vielfalt pflanzlichen Lebens, von Laub- und Lebermoosen am Boden bis zu Gefäßpflanzen mit hohen Kronen, die mehr Licht einfangen und an spezielle Klimazonen angepasst sind. Nadelbäume haben Kegelform, um das in hohen Breitengraden flach einfallende Sonnenlicht wirksam aufzunehmen; Schattenpflanzen enthalten Anthocyane als Sonnenschutz. Grünes Chlorophyll passt nicht nur ideal zur gegenwärtigen Zusammensetzung der Lufthülle, sondern trägt auch dazu bei, sie aufrechtzuerhalten – eine positive Rückkopplung, die dafür sorgt, dass unser Planet grün bleibt. Vielleicht wird irgendwann ein weiterer Evolutionsschritt einen Organismus hervorbringen, der im tiefen Schatten unter den Baumkronen gedeiht und wieder Carotinoide einsetzt, um grünes und gelbes Licht zu absorbieren. Doch die Lebensformen in den Wipfeln werden wohl weiterhin grün sein.

Exoplaneten in Rot

Wenn die Astronomen nach Fotosynthesefarbstoffen auf Planeten anderer Sonnensysteme suchen, müssen sie damit rechnen, dort alle möglichen Evolutionsphasen anzutreffen. Zum Beispiel könnten sie auf eine Welt stoßen, die aussieht wie die Erde vor zwei Milliarden Jahren – oder auf eine Fotosynthese, die anders als auf der Erde die Fähigkeit entwickelt hat, Wasser mittels langwelligerer Photonen aufzuspalten.

Die größte Wellenlänge, die bei der irdischen Fotosynthese je beobachtet wurde, liegt bei 1015 Nanometer im Infrarotbereich und wird von anoxygenen Purpurbakterien genutzt. Bei der oxygenen Fotosynthese hält den Rekord mit rund 720 Nanometern ein im Meer lebendes Cyanobakterium. Aber die Gesetze der Physik setzen keine strenge obere Schranke. Eine große Anzahl langwelliger Photonen vermag ebenso viel wie wenige kurzwellige.

Der Vielfalt exotischer Pigmentformen sind an sich kaum Grenzen gesetzt, doch nur ganz bestimmte passen zum Lichtspektrum auf der Planetenoberfläche, das in erster Linie vom Sterntyp bestimmt wird. Astronomen klassifizieren die Sterne nach deren Farbe, die von Temperatur, Größe und Alter abhängt. Nur wenige Typen sind so langlebig, dass sich auf ihren Planeten komplexes Leben zu entwickeln vermag; sie heißen, nach abnehmender Temperatur sortiert, F, G, K und M. Unsere Sonne ist ein G-Stern. F-Sterne sind größer, brennen heller und bläulicher und verbrauchen in einigen Milliarden Jahren ihren Brennstoff. K- und M-Sterne sind kleiner, lichtschwächer, rötlicher und langlebiger.

Um jeden dieser Sterne liegt eine bewohnbare Zone; dort umlaufende Planeten können eine Temperatur aufrechterhalten, die flüssiges Wasser zulässt. In unserem Sonnensystem enthält die bewohnbare Zone die Umlaufbahnen von Erde und Mars. Bei einem F-Stern liegt die bewohnbare Zone für einen erdähnlichen Planeten weiter außen, bei K- und M-Sternen weiter innen. Ein Planet in der bewohnbaren Zone eines F- oder K-Sterns empfängt ungefähr so viel sichtbare Strahlung wie die Erde. Dort könnte es durchaus oxygene Fotosynthese wie auf der Erde geben, nur wäre vielleicht die Pigmentfarbe innerhalb des sichtbaren Spektrums verschoben.

M-Sterne – auch Rote Zwerge genannt – sind besonders interessant, weil dieser Typ in unserer Galaxis am häufigsten vorkommt. Sie emittieren viel weniger sichtbare Strahlung als unsere Sonne; ihr Maximum liegt im nahen Infrarotbereich. John Raven, Biologe an der University of Dundee (Schottland), und Ray Wolstencroft, Astronom am Royal Observatory in Edinburgh, halten eine oxygene Fotosynthese mit Photonen im nahen Infrarot für möglich. Um ein Wassermolekül zu zerlegen, braucht ein Organismus demnach drei bis vier Infrarotphotonen statt der zwei, mit denen Pflanzen auf der Erde auskommen. Die Photonen wirken wie die Stufen einer Rakete zusammen, um einem Elektron die für die chemischen Reaktionen erforderliche Energie zu liefern.

M-Sterne stellen das Leben vor eine zusätzliche Herausforderung: In ihrer ungebärdigen Jugend neigen sie zu starken UV-Strahlungsausbrüchen, so genannten Flares. Organismen könnten den UV-Schäden tief unter Wasser entgehen – aber bekämen sie dort genug Licht? Wenn nicht, würde sich keine Fotosynthese entwickeln. Im Alter hören die M-Sterne allerdings auf, Flares zu produzieren, und emittieren sogar weniger UV-Strahlung als unsere Sonne. Dann brauchen Organismen keine schützende Ozonschicht; sie könnten sogar auf dem Land gedeihen, ohne Sauerstoff zu produzieren. Auf Planenten rings um Sterne anderer Spektralklassen müssten die Pflanzen hingegen Sauerstoff freisetzen, um sich abzuschirmen – oder aber für immer im Schutz der Meere verweilen.

Somit haben die Astronomen je nach Sternalter und Sterntyp vier Szenarien zu unterscheiden:

PLANETENSUCHE

Die Europäische Weltraumbehörde ESA plant für 2015 die Darwin-Mission: Drei gekoppelte Weltraumteleskope sollen die Spektren erdähnlicher Exoplaneten messen. Ein vergleichbares NASA-Projekt namens **Terrestrial Planet Finder** liegt noch auf Eis. Das ESA-Weltraumteleskop CoRoT, das im Dezember 2006 den Betrieb aufnahm, und die NASA-Raumsonde **Kepler**, deren Start für 2009 angesetzt ist, suchen nach Helligkeitsschwankungen, die erdähnliche Planeten beim Transit vor ihren Sternen erzeugen. Die NASA-Mission **PlanetQuest** soll nach Wackelbewegungen von Sternen fahnden, die durch umlaufende Planeten verursacht werden.

NASA, JPL / CALTECH

Mit fünf gekoppelten Weltraumteleskopen soll der Terrestrial Planet Finder nach Planeten suchen, die in der Nähe anderer Sterne kreisen.

➤ **Anaerobes Leben im Meer:** Das Zentralgestirn ist ein junger Stern beliebigen Typs. Die Organismen produzieren nicht unbedingt Sauerstoff; die Atmosphäre kann größtenteils aus anderen Gasen wie Methan bestehen.
➤ **Aerobes Leben im Meer:** Das Zentralgestirn ist ein älterer Stern beliebigen Typs. Die oxygene Fotosynthese hatte genügend Zeit, sich zu entwickeln; die Atmosphäre reichert sich allmählich mit Sauerstoff an.
➤ **Aerobes Leben an Land:** Das Zentralgestirn ist ein reifer Stern beliebigen Typs. Pflanzen bedecken das Festland. Diesem Szenario entspricht das Leben auf der Erde.
➤ **Anaerobes Leben an Land:** Der Stern ist ein zur Ruhe gekommener M-Stern ohne nennenswerte UV-Strahlung. Pflanzen bedecken das Festland, produzieren aber nicht unbedingt Sauerstoff.

Die Biosignaturen würden sich von Fall zu Fall deutlich unterscheiden. Aus den Erfahrungen mit Satellitenbildern der Erdoberfläche schließen die Astronomen, dass ozeanisches Leben mit Teleskopen nicht aufzuspüren wäre. Darum dürften die ersten beiden Szenarien so schwache Pigment-Biosignaturen erzeugen, dass das Leben sich nur durch die in die Atmosphäre freigesetzten Gase offenbaren könnte. Deshalb konzentrieren sich Forscher bei der Suche nach außerirdischen Pigmenten auf Landpflanzen, die entweder auf Planeten um F-, G- oder K-Sterne mit oxygener Fotosynthese gedeihen oder auf M-Stern-Trabanten mit beliebiger Fotosynthese.

In jedem Fall gelten dieselben Kriterien wie auf der Erde: Fotosynthesepigmente absorbieren vorrangig entweder besonders häufige oder möglichst energiereiche, kurzwellige Photonen – oder aber möglichst langwellige, die das Reaktionszentrum direkt aufzunehmen vermag. Um die Frage zu klären, wie der Sterntyp die Pflanzenfarbe beeinflusst, mussten die Forscher ein interdisziplinäres Puzzle aus Stern- und Planetendaten sowie biologischen Fakten zusammensetzen.

Auch Schwarz ist eine Pflanzenfarbe

Martin Cohen, Astronom an der University of California in Berkeley, sammelte Daten über einen F-Stern (Sigma Bootis), einen K-Stern (Epsilon Eridani), einen M-Stern mit aktiven Flares (AD Leo) und einen hypothetischen inaktiven M-Stern mit einer Temperatur von 3100 Kelvin. Antígona Segura, Astronomin an der Universidad Nacional Autónoma de México, simulierte per Computer erdähnliche Planeten in der bewohnbaren Zone dieser Sterne. Sie nutzte Modelle, die Alexander Pavlov, jetzt an der University of Arizona in Tucson tätig, und James Kasting von der Pennsylvania State University entwickelt hatten, um die Wechselwirkung zwischen einfallender Sternstrahlung und Planetenatmosphäre zu untersuchen. Unter der Annahme, dass Vulkane auf solchen Welten dieselben Gase ausstoßen wie auf der Erde, ermittelte Segura unterschiedliche chemische Vorgänge in der Atmosphäre – zum einen ohne Sauerstoff, zum anderen für ähnliche Sauerstoffniveaus wie auf der Erde.

KENN BROWN & CHRIS WREN, MONDOLITHIC STUDIOS

Blattwerk auf einem G-Stern-Planeten

Ausgehend von Seguras Ergebnissen berechnete Giovanna Tinetti, Physikerin am University College London, die Strahlungsfilterung; dafür nutzte sie ein Modell, das David Crisp vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) entwickelt hatte, um herauszufinden, wie viel Licht die Sonnenkollektoren der Mars-Rover erreicht. Für die Deutung dieser Berechnungen mussten fünf Expertinnen und Experten ihr Fachwissen kombinieren: die Mikrobiologin Janet Siefert von der Rice University in Houston (Texas), die Biochemiker Robert Blankenship von der Washington University in St. Louis und Govindjee von der University of Illinois in Urbana-Champaign, die Planetenforscherin Victoria Meadows von der University of Washington in Seattle und schließlich ich, eine Biometeorologin am NASA Goddard Institute for Space Studies in New York.

Wie wir herausfanden, sind die Photonen, welche die Oberfläche eines F-Stern-Planeten erreichen, überwiegend blau, mit dem Maxi-

Um Modelle außerirdischer Flora zu entwerfen, arbeiten Astrophysiker mit Pflanzenphysiologen zusammen

mum bei 451 Nanometer Wellenlänge. Um K-Sterne liegt die Spitze bei 667 Nanometer im Rotbereich – fast wie auf der Erde. Ozon spielt eine große Rolle: Es macht das Licht des F-Sterns blauer und das K-Licht röter. Die für Fotosynthese nutzbare Strahlung liegt im sichtbaren Bereich des Spektrums – wie auf der Erde.

Demnach könnten Pflanzen auf F- und K-Stern-Planeten gefärbt sein wie bei uns daheim, allerdings mit kleinen Abweichungen. Bei F-Sternen ist die Flut energiereicher blauer Photonen so intensiv, dass die Pflanzen sie vermutlich mittels eines Schutzpigments zurückwerfen müssen, das dem Anthocyan gleicht und ihnen einen Blauschimmer verleiht. Oder aber sie nutzen nur die blauen Photonen und verzichten auf das energieärmere grüne bis rote Licht; das würde im Spektrum des reflektierten Lichts eine merkliche blaue Kante erzeugen, die im Teleskop auffiele.

Die Bandbreite der M-Stern-Temperaturen ermöglicht eine große Vielfalt außerirdischer Pflanzenfarben. Ein Planet um einen ruhigen M-Stern ohne Flares würde etwa halb so viel Energie empfangen wie die Erde. Das ist zwar für Lebewesen mehr als genug – ungefähr 60-mal so viel wie irdische Schattenpflanzen brauchen –, aber die meisten Photonen gehören zum nahen Infrarotbereich. Das dürfte die Evolution einer größeren Vielfalt von Fotosynthesepigmenten anregen, die das gesamte sichtbare und infrarote Spektrum ausschöpfen. Da solche Pflanzen kaum Licht reflektieren, sehen sie für unsere Augen praktisch schwarz aus.

Gewächse unter Wasser

Wie das Beispiel der Erde zeigt, können auf passenden Planeten um F-, G- und K-Sterne fotosynthetische Lebewesen entstehen, welche die Phase der sauerstofffreien Atmosphäre im Meer überdauern und die oxygene Fotosynthese entwickeln, die schließlich zu Landpflanzen führt. Bei M-Sternen ist die Situation schwieriger. Wir haben eine ökologische Nische für frühe Lebensformen berechnet: Rund neun Meter unter Wasser können sie einerseits die UV-Flares überstehen und andererseits genug Licht für ihre Fotosynthese bekommen. Zwar würden wir diese Organismen nicht im Teleskop sehen, aber sie könnten Bedingungen für ein Leben an Land schaffen. Auf Welten, die um M-Sterne kreisen, dürften Landpflanzen, die ein breiteres Farbspektrum nutzen, beinahe so produktiv sein wie die irdischen Pflanzen.

Unabhängig vom Sterntyp stellt sich die Frage, ob die Landmassen eines Planeten so groß sind, dass man sie mit künftigen Weltraumteleskopen zu sehen vermag. Die erste Generation solcher Teleskope wird den Planeten nur als Punkt wahrnehmen; für eine Kartierung seiner Oberfläche reicht die Auflösung noch nicht aus. Die Wissenschaftler werden lediglich ein global gemitteltes Spektrum erhalten. Tinetti zufolge müssten mindestens 20 Prozent der Oberfläche wolkenfreies Festland mit dichter Vegetationsdecke sein, damit die Landpflanzen sich in diesem Spektrum bemerkbar machen.

Andererseits setzt die ozeanische Fotosynthese mehr Sauerstoff in die Atmosphäre frei. Darum gilt: Je deutlicher die Pigment-Biosignatur, desto schwächer die Sauerstoff-Biosignatur, und umgekehrt. Die Astronomen können nur entweder die eine oder die andere entdecken, nicht beide zugleich.

Wenn ein Weltraumteleskop im Spektrum des von einem Planeten reflektierten Lichts eine dunkle Bande bei einer der erwarteten Farben zeigt, dann wird derjenige, der dieses Beobachtungsdetail auf seinem Computer bemerkt, der erste Mensch auf Erden sein, der Lebenszeichen einer anderen Welt erblickt. Natürlich muss jeder Irrtum ausgeschlossen sein; beispielsweise könnten Mineralien dieselbe Signatur haben.

Jedenfalls besitzen wir eine plausible Farbpalette für Pflanzen auf einem anderen Planeten; zum Beispiel sagen wir voraus, dass der erdähnliche Planet grüne, gelbe oder orange Pflanzen trägt. Genauere Aussagen sind derzeit kaum möglich. Wie wir wissen, weist auf der Erde die Signatur des Chlorophylls eindeutig auf Pflanzen hin; darum können wir Landpflanzen und Meeresplankton per Satellit orten. Eindeutige Signaturen für die Vegetation auf anderen Planeten müssen wir erst herausfinden.

Leben auf anderen Planeten – üppiges Leben, nicht bloß Fossilien oder Mikroben, die unter extremen Bedingungen ein karges Dasein fristen – wird nun ein seriöser Forschungsgegenstand. Aber welche Sterne sollen wir ins Visier nehmen, wo es doch so viele gibt? Werden wir die Spektren von M-Stern-Planeten, die sich meist nahe dem Zentralgestirn aufhalten, überhaupt messen können? Welchen Wellenlängenbereich sollen die neuen Teleskope erfassen, welche Auflösung müssen sie erreichen?

Um diese Missionen zu planen und die gewonnenen Daten zu deuten, gilt es, alle Fassetten der Fotosynthese verstehen. Solche Fragen regen eine neue interdisziplinäre Forschungsrichtung an. Unsere Chance, anderswo im Universum Leben aufzuspüren, hängt davon ab, wie tief wir das Leben hier auf Erden begreifen. ◁

Nancy Y. Kiang ist Biometeorologin am NASA Goddard Institute for Space Studies in New York. Ihre Spezialität sind Computersimulationen der klimaregulierenden Wechselwirkung zwischen Ökosystemen und Atmosphäre. Außerdem gehört Kiang dem Virtual Planetary Laboratory an, einem Team des NASA Astrobiology Institute; es untersucht, wie man Leben auf fremden Welten entdecken kann. Kiang ist auch unabhängige Filmemacherin; ihr Kurzfilm »Solidarity« wurde auf mehreren Festivals gezeigt.

Kiang, N. Y. et al.: Spectral Signatures of Photosynthesis II: Coevolution with Other Stars and the Atmosphere. In: Astrobiology 7, Sonderheft über M-Sterne, S. 252 – 274, 2007.

Tinetti, G. et al: Water Vapour in the Atmosphere of a Transiting Extrasolar Planet. In: Nature 448, S. 169 – 171, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965707.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

DIE UNTERSCHÄTZTE WEISSE HIRNMASSE

Früher stand sie im Schatten der »kleinen grauen Zellen«. Doch die weiße Substanz unterhalb der Hirnrinde hat unerwartet große Bedeutung. So hilft sie beim Lernen, kann aber auch geistige Störungen bedingen, wenn sie nicht richtig funktioniert.

In Kürze

- **Die weiße Substanz des Gehirns** ist mehr als früher vermutet an vielen Vorgängen beteiligt – am Lernen, aber auch an Fehlfunktionen.
- So wichtig die Hirnrinde mit ihren »kleinen grauen Zellen« und den Synapsen (Kontakten der Neurone) für geistige Vorgänge ist: Die weißliche Hirnmasse aus langen, oft von Myelinscheiden (Markscheiden) umhüllten Nervenfasern sorgt für die **Koordination der Hirnregionen**.
- Myelin entsteht im Gehirn während Kindheit und Jugend erst nach und nach. Dabei bildet es sich in den einzelnen Gebieten zu unterschiedlichen Zeiten, teilweise erst im dritten Lebensjahrzehnt. Das sind Vorgaben für das **Lernvermögen** und die **Selbstkontrolle**. Störungen des Prozesses können Schizophrenie, Autismus und sogar Phänomene wie krankhaftes Lügen bedingen.

Von R. Douglas Fields

Angenommen, wir könnten Menschen einfach so in den Kopf blicken und erkennen, wodurch sie klüger oder dümmer sind als andere. Oder uns fiele dabei an einem Geisteskranken oder einem Legastheniker ein Zusammenhang mit ihrer Eigenart auf. Dergleichen Unterschiede können Forscher jetzt mit einem neuen Bildgebungsverfahren tatsächlich aufdecken. Aber sie erleben eine Überraschung: Auf die Intelligenz wie auf verschiedene geistige und psychische Störungen und Eigenarten nehmen auch Hirnbereiche Einfluss, die aus so genannter weißer Substanz bestehen.

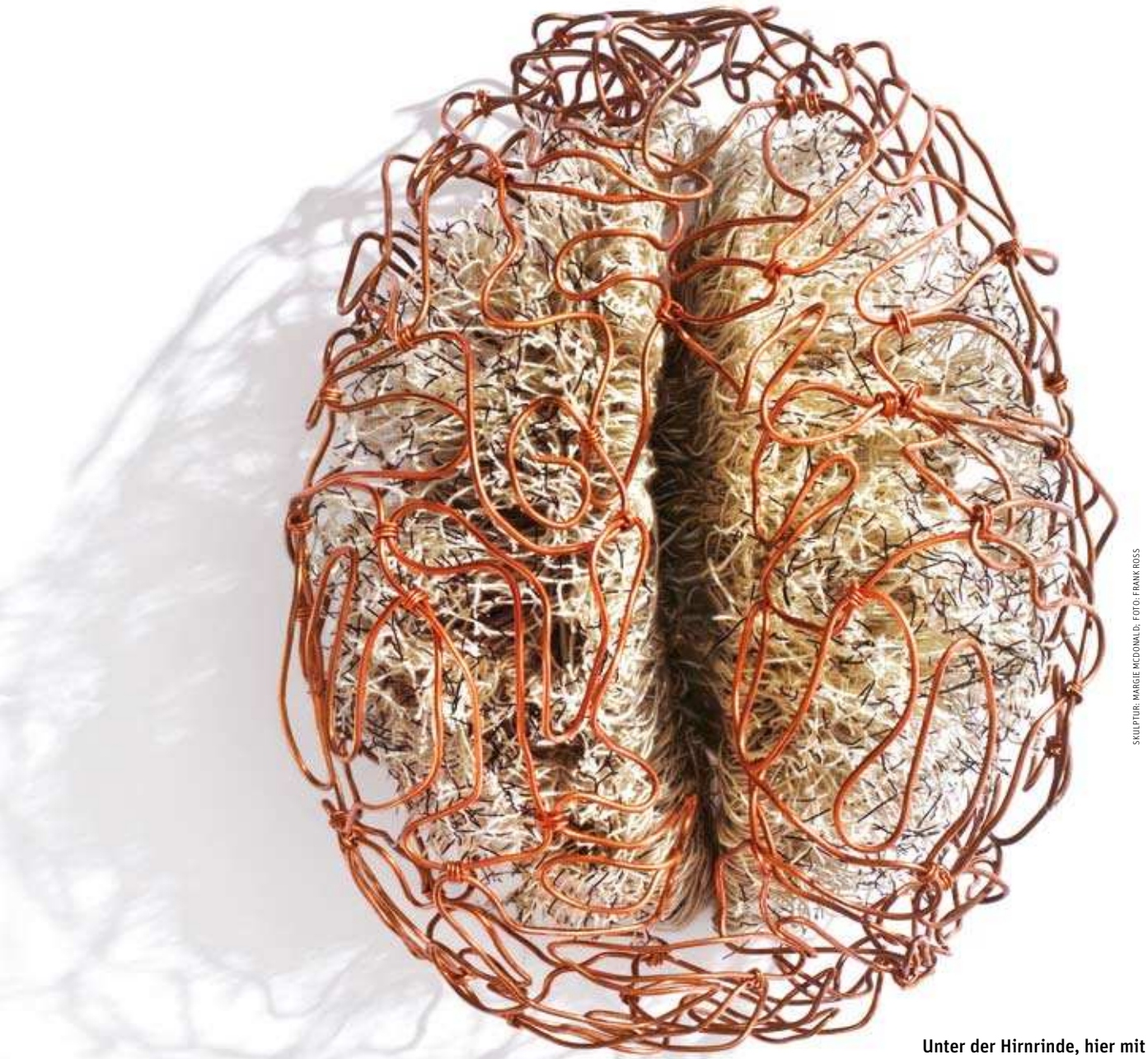
In der grauen Substanz – der Hirnrinde mit den berühmten »kleinen grauen Zellen«, wie es nicht ganz korrekt heißt – spielen sich die mentalen Verrechnungsprozesse ab. Dort stecken auch die Gedächtnisinhalte. Denn in der Hirnrinde, dem Kortex, befinden sich die Entscheidungsträger: die Zellkörper der eng untereinander vernetzten Nervenzellen oder Neurone. In der Tiefe aber liegt die weiße Substanz. Sie macht beim Menschen fast die Hälfte des Gehirns aus, mehr als bei jedem anderen Lebewesen. Diese weiße Hirnmasse besteht großenteils aus Millionen langer Verbindungskabel. Jedes davon enthält einen Nervenzellausläufer, der Signale zu anderen Neuronen weiterleitet – ein so genanntes Axon. Viele dieser Axone sind mit fetthaltigem, weißlichem Myelin umwickelt, auch als Myelin- oder Markscheide bezeichnet. Wie in einem Telefonnetz verlaufen diese Kabel in Bündeln und Strängen, die sich dann wieder teilen und Neurone verschiedener, oft entfernter Hirnorte miteinander verbinden.

Früher hatten Neurowissenschaftler an der weißen Substanz wenig Interesse. Sie glaubten, die Myelinscheide diene bloß zur elektrischen Isolierung, und die Nervenzellausläufer seien kaum mehr als passive Leitungsbahnen. Deswegen drehten sich Theorien zum Lernen, zum Gedächtnis oder zu psychischen Störungen hauptsächlich um das molekulare Geschehen einerseits in den Neuronen selbst, andererseits an den Synapsen, den winzigen Kontaktstellen zwischen Nervenzellen.

Inzwischen merken die Forscher, dass sie die weiße Substanz unterschätzt haben. Den Informationsaustausch zwischen den Hirnregionen beeinflusst sie stärker als gedacht. So kann geistige Betätigung des Gehirns ihre Menge steigern. Umgekehrt gehen manche Hirnstörungen mit einem Myelinmangel einher. Studien zeigen auch, dass die weiße Hirnmasse zunimmt, wenn jemand etwas neu lernt oder viel übt, etwa ein Musikinstrument. Sicher – die mentalen Operationen für Denken und Verhalten führt die graue Substanz durch. Aber die weiße Substanz des Gehirns dürfte die Verstandesarbeit, die soziale Kompetenz und den Lernerfolg viel stärker mitbestimmen als früher vermutet. Mit ihrem Verhalten können wir nun auch besser als bisher erklären, warum ältere Menschen nicht mehr so leicht Neues lernen.

Mehr als nur Kabelsalat

Seit jeher gab das Myelin der Wissenschaft Rätsel auf. Schon lange hatten mikroskopische Untersuchungen gezeigt, dass die extrem langen, dünnen Ausläufer von Nervenzellen – die Axone – oft in einen fetthaltigen, weißlich erscheinenden Mantel gehüllt sind. Doch glaubten die Forscher zunächst, diese Myelin- oder Markscheide diene allein der elektrischen Isolierung – ähnlich wie der Gummiüberzug bei einem Kupferkabel. Nur – wieso war der Mantel mancher Axone dicker, der anderer dünner, und wieso waren viele



SKULPTUR: MARGIE MCDONALD; FOTO: FRANK ROSS

Unter der Hirnrinde, hier mit Kupferdraht nachempfunden, liegt die weiße Substanz aus dicht gepackten Nervenfasern.

Fasern, besonders die dünneren, so gut wie nackt? Und wozu wies die Myelinscheide ungefähr alle Millimeter eine kleine Lücke auf, Ranvier-Schnürring genannt (siehe den Kasten auf S. 44/45).

Erst viel später stellte sich heraus, dass Nervenimpulse an einem myelinisierten Axon grob gesagt 100-mal schneller vorwärtskommen als an einem nackten. Denn Myelin umwickelt die Nervenfaser zwischen den Lücken tatsächlich wie ein Isolierband, und zwar mit bis zu 150 Schichten. Dank dieser Hüllschicht springt das elektrische Signal regelrecht von einem Schnürring zum nächsten. Dieses Prinzip gilt im Gehirn ebenso wie bei Nervenfasern, die sich durchs Rückenmark oder in die Extremitäten ziehen. Auch enthält nicht nur die weiße Hirnmasse Fasern mit einer Markscheide, denn viele Nervenzellfortsätze in der Großhirnrinde bekommen ebenfalls eine Hülle. Das Myelin wird von zwei Typen so genannter Gliazellen produziert, im Gehirn und Rückenmark von Oligodendrozyten (siehe den Kasten auf S. 44/45), ansonsten von Schwannzellen. Die Gliazellen sind selbst keine Neurone. Im Gehirn übersteigt ihre An-

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

zahl die der Nervenzellen jedoch um ein Mehrfaches (siehe »Die unbekannte Seite des Gehirns. Wie Gliazellen im Kopf mitreden«, SdW 9/2004, S. 46).

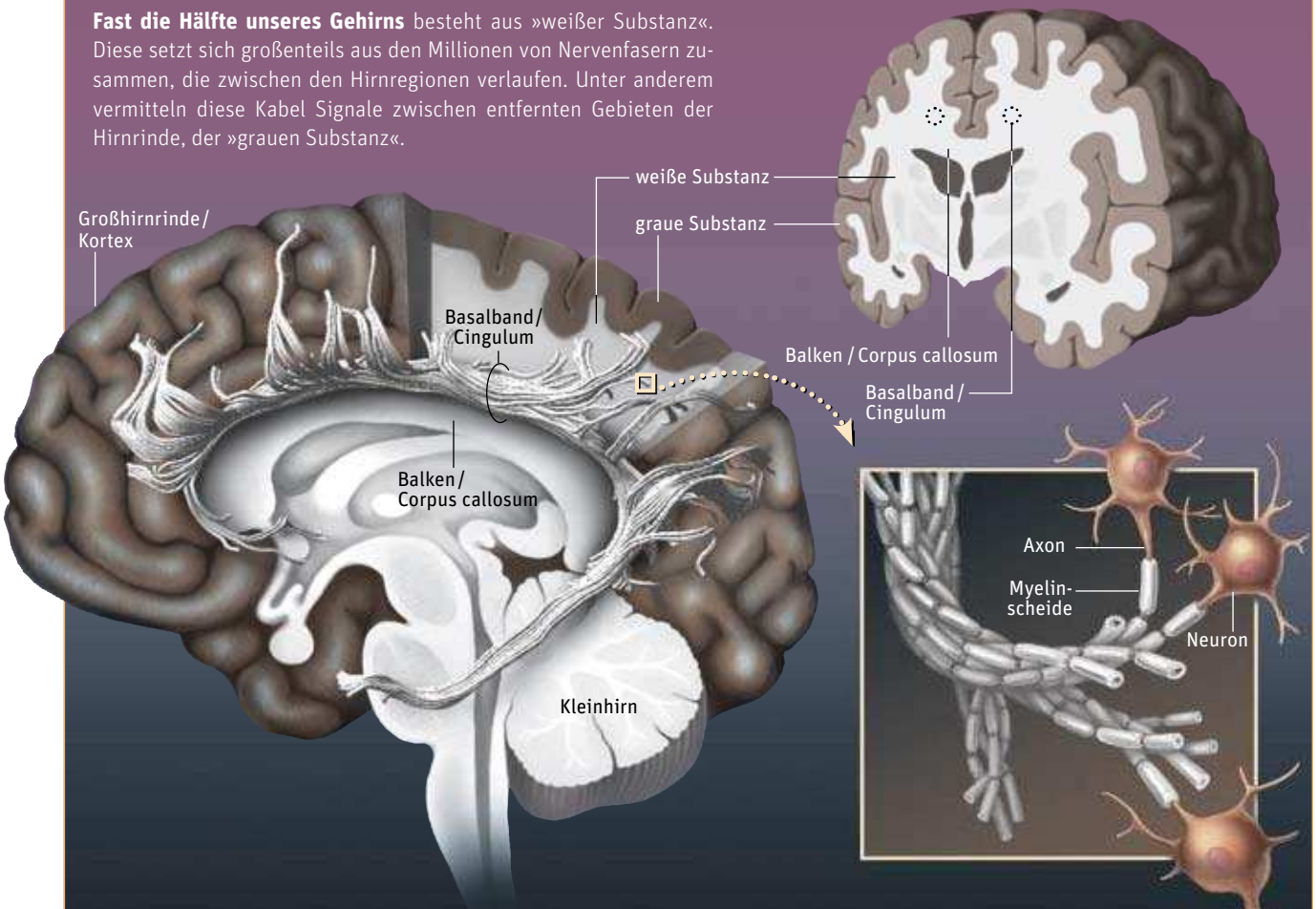
Ohne Myelinscheide würden die Nervensignale über längere Strecken praktisch versickern. Die größte Geschwindigkeit erzielen sie bei einem bestimmten Verhältnis von Schichtdicke zu Axondurchmesser. Der Durchmesser des nackten Axons sollte sechs Zehntel der Gesamtdicke der umhüllten Faser betragen. Allerdings sind die Nervenzellauswüchse unterschiedlich dick. Die große Frage ist: Wie erkennen die Gliazellen, ob sie um ein Axon zehn oder hundert Lagen wickeln sollen? Hierüber wissen wir noch wenig.

Vor einigen Jahren entdeckten dazu Klaus-Armin Nave und sein Team vom Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen, dass zumindest Schwannzellen auf ein bestimmtes Protein aus der Gruppe der Neureguline reagieren, und eben diese Moleküle kommen auf der Oberfläche von Axonen vor. Sind mehr von den Neuregulinen anwesend als normal, dann bilden sich mehr Schichten, bei erniedrigter Proteinmenge weniger. Vielleicht existiert ein ähnlicher Zusammenhang auch im Gehirn. Denn bei vielen Manisch-Depressiven und Schizophrenen ist ein Gen defekt, das die Produktion eben dieses Proteins reguliert.

Etwas mehr wissen wir über die Myelinisierung des Gehirns in Kindheit und Jugend. Aufschlussreich ist zum Beispiel, wann die einzelnen Regionen der Großhirnrinde myelinisiert werden (siehe den Kasten auf S. 46/47). Bei Neugeborenen weisen erst wenige Hirnregionen reichlich umhüllte Fasern auf. Das

Jenseits der kleinen grauen Zellen

Fast die Hälfte unseres Gehirns besteht aus »weißer Substanz«. Diese setzt sich großenteils aus den Millionen von Nervenfasern zusammen, die zwischen den Hirnregionen verlaufen. Unter anderem vermitteln diese Kabel Signale zwischen entfernten Gebieten der Hirnrinde, der »grauen Substanz«.



Zur weißen Substanz gehört der Balken, das Corpus callosum. Die Fasern dieser ausgedehnten Struktur verbinden die beiden Großhirnhemisphären. Auf beiden Hirnseiten verläuft darüber das Cingulum, eine wichtige Assoziationsbahn.

In den von Myelinscheiden weißlich umhüllten Kabeln der weißen Substanz stecken die Axone von Nervenzellen, die darüber Signale in andere Hirngebiete schicken.

ILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN; TRACTOGRAPHIE (RECHTS): DEREK JONES, CARDIFF UNIVERSITY

PHILIPS HEALTHCARE

Die weiße Substanz ist mit einem herkömmlichen Magnetresonanztomografen (Bild links) darstellbar (obere Aufnahme unten). Die neue Diffusionstensor-Bildgebung zeigt die Strukturen allerdings differenzierter (ganz unten). Rot und gelb stehen für einen höheren Organisationsgrad.

Ausmaß nimmt dann schubweise zu, wobei die einzelnen Hirngebiete verschieden schnell erfasst werden. Einige Orte sind erst bei 25- oder 30-Jährigen voll versorgt. Grob gesagt schiebt sich der Prozess in der Großhirnrinde wie eine Welle vom Nacken zur Stirn. Zunächst werden Hirnrindenbereiche myelinisiert, die Sinneswahrnehmungen verarbeiten und Bewegungen steuern. Zuletzt kommen jene Bezirke der Stirnlappen an die Reihe, die für höhergradiges Denken, Planen und Urteilen zuständig sind – alles Fähigkeiten, die Erfahrung voraussetzen. Diese Beobachtung ließ Forscher spekulieren, der dürftige Zustand jener Hirnfasern bei Jugendlichen könnte mit ein Grund sein, wenn es ihnen manchmal an Zurechnungsfähigkeit mangelt. Zumindest aber scheint Myelin generell für Intelligenz wichtig zu sein.

Klavierüben stärkt Hauptstränge zwischen Hirngebieten

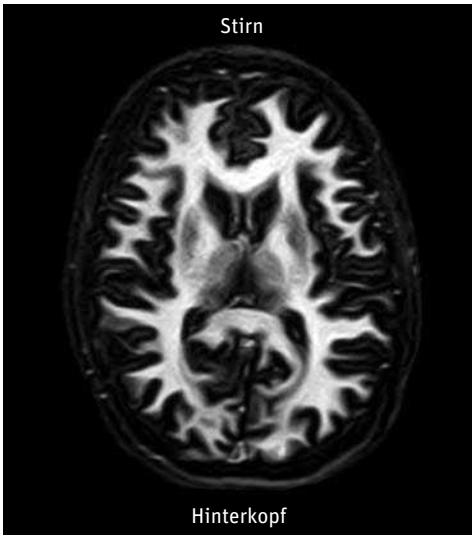
Wahrscheinlich zieht sich die Myelinisierung im Gehirn bis ins frühe Erwachsenenalter hin, weil auch die Axone noch bis in diese Lebensphase wachsen. Sie reagieren solange auf Erfahrungen, bilden auch neue Verzweigungen aus und stutzen andere zurück. Eine Myelinscheide würde solche Umbauprozesse stark behindern. Trotzdem rätselten die Forscher lange, ob die Hüllenbildung ganz und gar vorprogrammiert ist, oder ob Lebenserfahrungen die Schichtdicke beeinflussen – und hierüber das Lernvermögen mit vorgeben. Ist das Myelin etwa für geistige Leistungen regelrecht mit verantwortlich?

Dem ging auch der schwedische Pianist und Hirnforscher Frederick Ullén nach. Neben seiner Tätigkeit als Konzertmusiker arbeitet er als Forschungsdirektor am Stockholm-Hirninstitut des Karolinska-Instituts. Im Jahr 2005 erstellte er mit seinen Mitarbeitern Hirnaufnahmen von Klavierprofis. Das Team wandte eine neue, abgewandelte Version der Magnetresonanztomografie an, die Diffusionstensor-Bildgebung (DTI, *diffusion tensor imaging*). Man benutzt dazu die gleiche Art Geräte, aber andere Magnetfelder. Zudem werden die vielen scheibenartigen Aufnahmen mit besonderen Algorithmen zu dreidimensionalen Darstellungen fusioniert. Bei dieser Aufnahmetechnik wird die Diffusionsrichtung von Wassermolekülen im Gewebe erfasst (Vektoren oder allgemeiner Tensoren).

Die graue Substanz liefert nur schwache DTI-Signale, weil die Wassermoleküle dort überwiegend in alle Richtungen etwa gleich diffundieren. In den Axonbündeln der weißen Substanz aber können die Wassermoleküle das wegen des vielen Myelins nicht – es gibt bevorzugte Richtungen und somit stärkere DTI-Signale. Dadurch hebt sich die weiße Masse hervor. Man erkennt auf den errechneten Bildern gut die Hauptstränge von Nervenfasern, also die wichtigsten Wege, über die Information zwischen den Hirngebieten fließt. Die Bildsignale sind umso stärker, je dicker die Fasern mit Myelin umhüllt sind und je dichter sie liegen.

Die schwedischen Forscher stellten tatsächlich fest, dass einige Regionen der weißen Substanz bei Berufspianisten stärker ausgeprägt sind als bei Nichtmusikern. Es handelt sich dabei um Verbindungsstränge zwischen Großhirnrindengebieten für koordinierte Fingerbewegungen und solchen, in denen beim Musizieren kognitive Prozesse ablaufen.

Wie Ullén auch erkannte, traten diese Passagen auf den Bildern umso deutlicher hervor,



JOE GALLIVAN, ULSTER MEDICAL AND SURGICAL SPECIALISTS

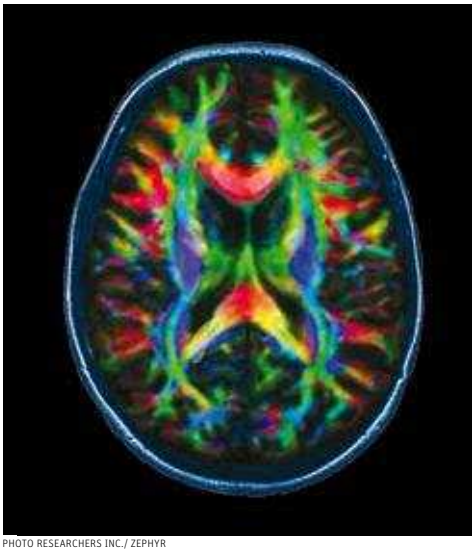


PHOTO RESEARCHERS INC./ ZEPHYR

KRANKHEITEN DURCH MYELINSCHÄDEN

Zusammenhang gesichert bei:

- multipler Sklerose
- Zerebralparese (Störung der Muskelsteuerung)
- Alexander-Krankheit (Zerstörung des Zentralnervensystems)

Zusammenhang vermutet bei:

- Schizophrenie
- Autismus
- manisch-depressiver Erkrankung
- Legasthenie

je mehr der Musiker über die Jahre täglich geübt hatte. Demnach trugen die Fasern nun mehr Myelin, oder sie lagen dichter. Vielleicht waren die Axone einfach dicker geworden und hatten entsprechend auch eine dickere Hülle erhalten. Leider ließ sich das mit dem Verfahren nicht entscheiden. Immerhin zeigt diese Studie, dass das Erlernen einer komplexen Fertigkeit in der weißen Substanz etwas verändert – obwohl sie weder Zellkörper von Neuronen enthält noch Synapsen, sondern nur Axone und Gliazellen.

Genauere Auskunft liefert uns die Tierforschung. Sie zeigt in der Tat, dass besonders frühe Erfahrungen die Myelinmenge beeinflussen. Dies bestätigten auch Untersuchungen des Neurobiologen William T. Greenough von der University of Illinois in Urbana-Champaign. Bei Ratten, die in einem »anregenden Umfeld« aufgewachsen waren, fand er im so genannten Balken (dem Corpus callosum, das die beiden Vorderhirnhälften verbindet) einen größeren Anteil myelinisierter Fasern als nach Aufzucht in einem normalen, langweilig ausgestatteten Käfig.

Aufschlussreiche Befunde vom Menschen lieferte Vincent J. Schmithorst vom Cincinnati Children's Hospital in Ohio. Der Neurowissenschaftler machte Aufnahmen der weißen Substanz von Fünf- bis 18-Jährigen und entdeckte, dass höher entwickelte weiße Substanz direkt auch mit einem höheren Intelligenzquotienten korrelierte. Nach anderen Studien weist der Balken schwer verwahrloster Kinder bis zu 17 Prozent weniger weiße Masse auf.

Wie Gliazellen zur Feinabstimmung verhelfen

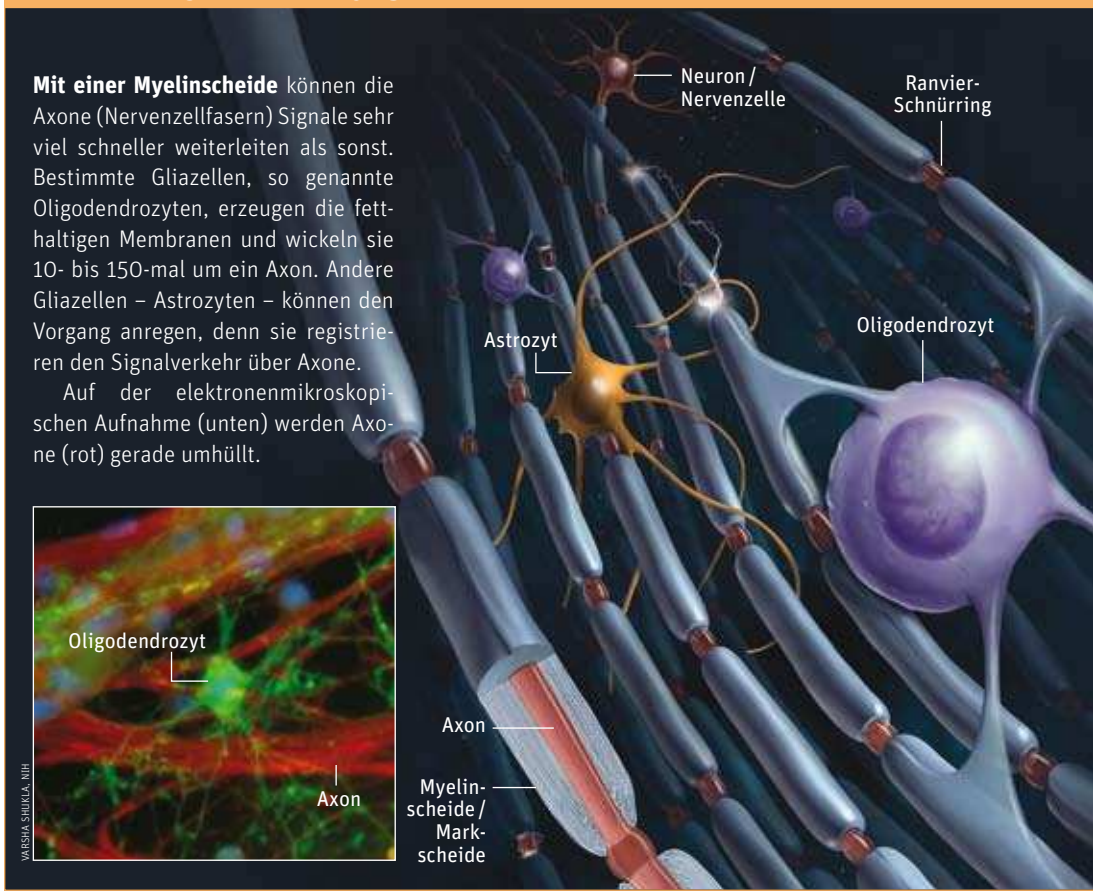
Obwohl Ergebnisse dafür sprechen, dass Erfahrungen die Myelinbildung fördern und dass dies anschließend beim Lernen nützt – ein Zusammenhang ist so lange nicht zu beweisen, wie wir nicht wissen, wie mehr Myelin die kognitiven Fähigkeiten steigert. Ebenso bräuchten wir umgekehrt auch Belege dafür, dass Myelindefekte die geistige Leistung unter Umständen mindern.

Einige unserer Forschungen widmeten sich dem Einfluss von Erfahrungen. Zum Beispiel ließen wir Neurone von Mäuseembryonen in Kulturschalen heranwachsen. Die Schalen waren mit Elektroden ausgestattet, so dass wir den Zellen Muster von elektrischen Impulsen verabreichen konnten. Im Gehirn schicken Neurone elektrische Signale über ihre Axone

MYELIN VON NAHEM GESEHEN

Mit einer Myelinscheide können die Axone (Nervenzellfasern) Signale sehr viel schneller weiterleiten als sonst. Bestimmte Gliazellen, so genannte Oligodendrozyten, erzeugen die fetthaltigen Membranen und wickeln sie 10- bis 150-mal um ein Axon. Andere Gliazellen – Astrozyten – können den Vorgang anregen, denn sie registrieren den Signalverkehr über Axone.

Auf der elektronenmikroskopischen Aufnahme (unten) werden Axone (rot) gerade umhüllt.

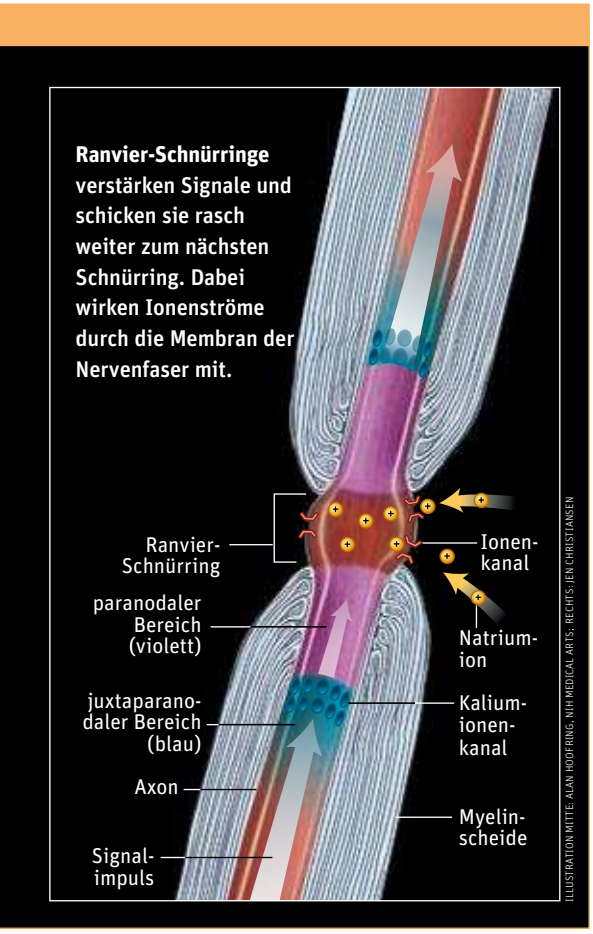


VARSHA SHUKLA, NIH

weiter. Wir entdeckten, dass sich unsere Impulse auf die Aktivität bestimmter Gene der jungen Nervenzellen auswirkten. Eines jener Gene sorgt für die Produktion eines klebrigen Proteins namens L1-CAM. Dieses Protein wird gebraucht, um außen am Axon zu Beginn der Myelinbildung die erste Membranschicht zu befestigen.

Zudem reagiert die Glia, wie wir herausfanden, auf elektrische Impulse, sozusagen den elektrischen Verkehr, entlang von Axonen. Die Myelinisierung wird darauf abgestimmt. Bei gesteigertem Verkehr schütten so genannte Astrozyten, eine Sorte der Gliazellen, eine bestimmte Substanz aus. Dieser chemische Faktor regt die Oligodendrozyten dazu an, mehr Myelin zu bilden. Bei der seltenen Alexanderkrankheit (auch Morbus Alexander), die meist kleinere Kinder trifft, ist ein Astrozytengen mutiert. Die Myelinisierung ist deswegen schadhaft, und bei den Kindern treten geistige Defekte auf.

Was die weiße Hirnmasse leisten muss, macht aber auch reines Nachdenken klar. Wer vielleicht meint, im Gehirn sollten alle Informationen stets so schnell wie möglich weitergeleitet werden, der irrt. Axone benötigen keineswegs alle die gleiche Myelinschicht. Denn



Bei Kindern korreliert höher entwickelte weiße Substanz mit einem höheren Intelligenzquotienten

wichtige **online adressen**

Bücher,
die die Welt bewegen
www.astronovia.de

Mehr als 350 DVD-Reisefilme
stellen Länder, Inseln und Städte vor
www.dvdtravel.de

Kernmechanik –
von Kernspin bis Kosmologie,
von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

Portraits, Interieurs,
Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

Dieses Buch wird Ihnen die Augen öffnen:
Reinhard Gutmann,
Kennen Sie die Wirklichkeit?
Ein Muß für jeden wissenschaftlich Interessierten!
www.reinhard-gutmann.at

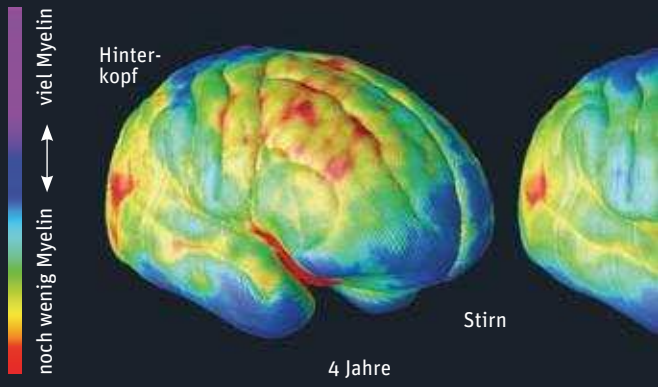
Die Universität
kommt ins Wohnzimmer!
Vorlesungen von Professoren
DVD, Hörbuch und Mansukript
www.uni-auditorium.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

Das Denken reift zuletzt

Die Großhirnrinde weist zunächst nur wenige gut myelinisierte Bereiche auf – also Gebiete, in denen relativ viele Axone eine Myelinscheide besitzen. Orte für Basisfunktionen wie das Sehen sind früh myelinisiert. Bald folgen die Sprachregionen, und ganz zuletzt reifen Zonen für die Selbstkontrolle. Aber auch bei 20-Jährigen ist die Myelinisierung noch nicht abgeschlossen. Diese Aufnahmen erstellte Paul Thompson von der University of California in Los Angeles. Dazu ermittelte er die Dichte der Neurone in der Hirnrinde. Sie wird im Lauf der Jahre geringer, während wohl zugleich unter anderem die Myelinmenge zunimmt.



GETTY IMAGES, INTI ST. CLAIR

Die weiße Substanz ist in einigen Hirnregionen bei professionellen Pianisten besonders stark ausgebildet. Die Ursache dafür ist tatsächlich das viele Üben – vor allem, wenn damit schon im Grundschulalter begonnen wird.

im Gehirn bedeutet schneller nicht immer auch besser.

Jedes Hirnzentrum ist für bestimmte Funktionen zuständig und schickt sein Verrechnungsergebnis dann in andere Gebiete mit weiteren speziellen Aufgaben. Oft liegen zwischen den einzelnen Verarbeitungsstationen beträchtliche Distanzen. Lernt man etwas so Komplexes wie Klavierspielen, dann herrscht zwischen vielen Hirnregionen ein reger Austausch. Die einzelnen Wege sind verschieden weit. Trotzdem müssen Botschaften aus mehreren Richtungen und verschiedenen Entfernungen am selben Ort zur gleichen Zeit und überdies zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt eintreffen.

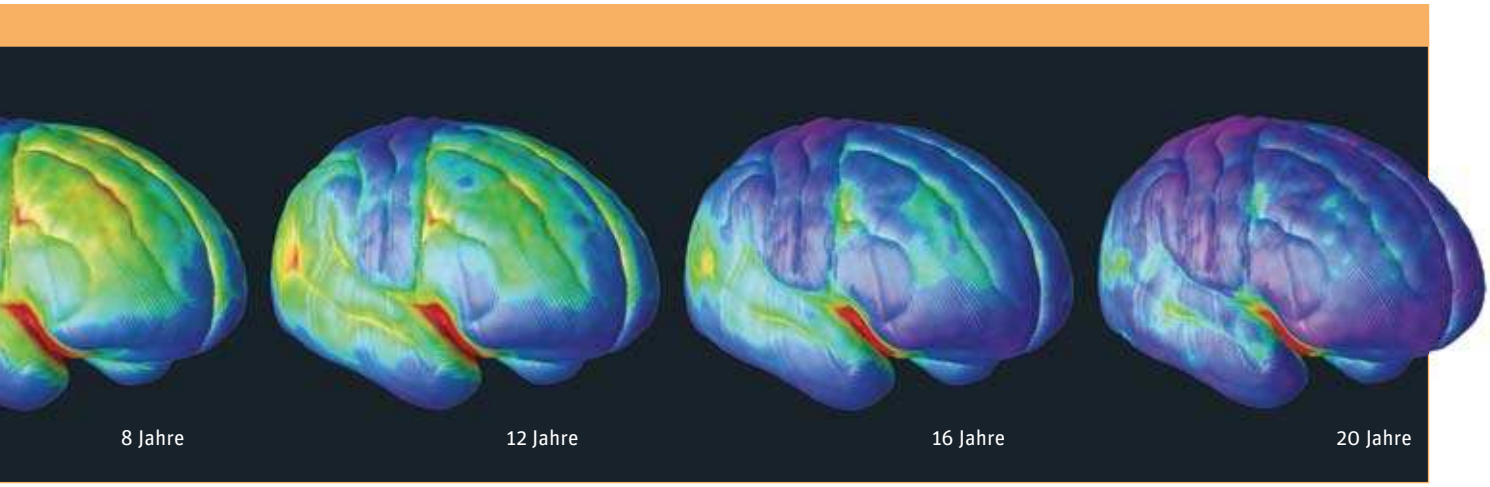
Diese präzise Koordination gelingt nicht ohne fein abgestimmte Verzögerungen in den Signallaufzeiten. Rast ein Signal im Balken über eine Faser mit Myelinscheide, benötigt es zur anderen Hirnhälfte im typischen Fall etwa 30 Millisekunden. Ohne Myelin dauert der Weg 150 bis 300 Millisekunden. Bei der Geburt trägt noch keines der Axone im Balken eine Hülle. Aber auch noch beim Erwachsenen sind 30 Prozent von ihnen praktisch nackt. Die unterschiedliche Ausstattung dient der zeitlichen Koordination.

Die regelmäßigen Einschnitte an den Markscheiden, die Ranvier-Schnürringe, sind für exakte Zeitabläufe vielleicht ebenso bedeutsam. Sie wirken als Relaisstationen, die elektrische Signale entlang einem Axon verstärken, steuern und weiterleiten. Welche Rolle die Schnürringe für die Leitungsgeschwindigkeit spielen, erkannten Neurobiologen bei Eulen, als sie nach dem Grund für deren ausgezeichnetes Hörvermögen suchten. Bei diesen Vögeln statten die Oligodendrozyten manche Axone sogar mit mehr Schnürringen aus, als für eine möglichst schnelle Signalübertragung optimal wäre. Anscheinend macht das die Fasern wieder etwas langsamer – hier offenbar ein Mittel für präzise Sinneswahrnehmung.

Die Bedeutung der Signalgeschwindigkeit und ihrer genauen Justierung lassen sich gar nicht überschätzen. Zur Gedächtnisbildung gehört, dass neuronale Schaltkreise stärkere Verknüpfungen ausbilden. Myelin könnte dazu beitragen, indem es Leitungsgeschwindigkeiten aufeinander abstimmt. Ein Neuron erhielte so aus verschiedenen Richtungen genau gleichzeitig Impulssalven. Das ergäbe ein stärkeres Gesamtsignal, was wiederum die Verbindungen zwischen den beteiligten Nervenzellen kräftigen würde. Bisher ist das weit gehend Theorie. Viel Forschung ist noch nötig, um die Zusammenhänge wirklich zu verstehen. Außer Zweifel steht aber zumindest, dass das Myelin auf Umwelteinflüsse anspricht und beim Lernen mitwirkt.

Vor diesem Hintergrund lässt sich denken, dass eine unsaubere Signalübertragung womöglich geistige Funktionen beeinträchtigt. Suchten Forscher bisher die Ursachen mancher Störungen allein bei der grauen Substanz, so verdächtigen sie nun auch die weiße Hirnmasse. Zum Beispiel funktioniert bei Legasthenie die zeitliche Abstimmung einiger Prozesse nicht so gut, die beim Lesen zusammenarbeiten müssen. Hirnaufnahmen zeigen an den betreffenden Bahnen tatsächlich weniger weiße Substanz, was für einen Zusammenhang sprechen mag. Nach heutiger Auffassung können solche Defizite der weißen Substanz sowohl Fehler im Myelinisierungsprozess selbst widerspiegeln als auch Entwicklungsstörungen von zugehörigen Nervenzellen.

Bei der so genannten Tontaubheit – wenn Menschen verschieden hohe Töne nicht unterscheiden können – funktioniert in der Großhirnrinde die höhere Verarbeitung von Tönen nicht. So scheint ein Faserbündel im rechten



PAUL THOMPSON, UCLA

Vorderhirn weniger weiße Substanz zu enthalten als normal. Offenbar kann Tabakrauch die Myelinisierung an diesem Ort beeinträchtigen. Ein Mangel dort kann bei Personen auftreten, deren Mutter in der späten Schwangerschaft geraucht hat, aber auch, wenn jemand als Jugendlicher selbst Zigaretten konsumiert hat, also in einem entscheidenden Alter für die Myelinisierung. Das wies Leslie K. Jacobsen von der Yale University in New Haven (Connecticut) nach. Wie gut Testpersonen in entsprechenden Hörtests abschnitten, hing davon ab, wie gut jene Hirnstruktur ausgebildet war. Nikotin beeinträchtigt nämlich Rezeptoren der Oligodendrozyten, die auf die Entwicklung dieser Gliazellen Einfluss nehmen.

Schizophrenie: Ist die weiße Masse mit schuld?

Schizophrenie versteht man heute als Entwicklungsstörung, wobei im Gehirn unter anderem anormale neuronale Verknüpfungen auftreten. Schon immer fiel auf, dass die Krankheit oft in der Adoleszenz ausbricht – also nach heutigem Wissen gerade in der Entwicklungsphase des Vorderhirns, wenn zwar deren Neurone weit gehend ausgebildet sind, die Myelinisierung aber noch weitergeht. In den letzten Jahren ergaben fast 20 Studien, dass die weiße Substanz mehrerer Hirnregionen bei Schizophrenen ungewöhnlich wenig Oligodendrozyten aufweist. Neuerdings lieferten Tests mit Genchips, mit denen sich tausende Gene gleichzeitig erfassen lassen, eine Überraschung: Die Forscher erkannten, dass viele der bisher aufgespürten Schizophreniegene für die Myelinbildung wichtig sind. Gemeint sind damit mutierte Gene, die mitunter mit der Krankheit assoziiert werden.

Auch bei verschiedenen anderen Syndromen fanden Forscher Abweichungen in der weißen Hirnmasse: so bei Menschen mit Aufmerksamkeitsstörung und Hyperaktivität, bei Manisch-Depressiven, bei Sprachstörungen, Autismus, bei geistigen Einbußen im Alter sowie bei Alzheimer, ja sogar bei pathologischen Lügnern.

Man mag einwenden, eine schlechte Signalübertragung zwischen Neuronen könnte solche Defekte in der weißen Substanz erst hervorrufen und nicht umgekehrt. Dann wäre dürftig entwickeltes oder geschwundenes Myelin Folge von mangelhafter Signalgebung durch die Nervenzellen, nicht eine Ursache davon. Denn schließlich sind die kognitiven Funktionen auf die Kontakte zwischen den Nervenzellen angewiesen, die in der grauen Substanz der Hirnrinde stattfinden. Über diese Synapsen kommunizieren die Neurone miteinander. Dort wirken übrigens die meisten Psychopharmaka.

Allerdings müssen sich für adäquate geistige Leistungen auch verschiedene Hirngebiete miteinander austauschen – und hierfür bildet die weiße Substanz das Substrat. Als der Neurologe Gabriel Corfas vom Children's Hospital in Boston (Massachusetts) im Jahr 2007 bei Mäusen gewisse Gene in Oligodendrozyten zerstörte – wohlgemerkt nicht in Neuronen –, verhielten sich die Nager wie schizophren. Dazu gehörte auch ein Gen für ein Neuregulin, das bei Schizophrenie mutiert sein kann.

Ob sich nun abgewandeltes Myelin auf Neurone auswirkt oder ob umgekehrt veränderte Neuronensignalmuster das Myelin beeinträchtigen – die alte Frage nach Henne oder Ei dürfte, wie immer, in bewährter Weise beigelegt werden. Womöglich kommt nicht eines zuerst, sondern beides bedingt sich wechselseitig. Die Gliazellen können nämlich einerseits auf einen veränderten Axondurchmesser reagieren, also das Myelin daran anpassen. Andererseits aber wirken sie auch selbst auf den Durchmesser ein. Gliazellen können sogar darüber bestimmen, ob ein Axon über-

HOFFNUNG AUF HEILUNG

Eine Anzahl namhafter Forschergruppen untersucht inzwischen molekulare und physiologische Prozesse rund um die Myelinbildung. Unter anderem beginnen die Wissenschaftler dadurch zu verstehen, wieso durchtrennte Nerven im Rückenmark nicht nachwachsen – anders als etwa in den Gliedmaßen. Die Erkenntnisse, die sich im Tierversuch schon teilweise umsetzen ließen, könnten einmal Querschnittgelähmten zugutekommen. Auch für degenerative Erkrankungen wie die multiple Sklerose, bei denen das Myelin um Nervenfasern zerstört wird, erhoffen sich die Mediziner neue Behandlungsansätze. Denkbar wäre etwa die gezielte Steuerung von Faktoren der Myelinbildung.

Bei Rückenmarksverletzungen verhindern Proteine im Myelin normalerweise, dass die durchtrennten Fasern nachwachsen

lebt oder nicht. Geht zum Beispiel bei einer multiplen Sklerose die Myelinscheide zu Grunde, stirbt anschließend womöglich die Nervenzelle samt Axon ab.

Fest steht zumindest, dass die Verbindungen zwischen den Hirnregionen während der Hirnreifung bis ins Erwachsenenalter immer präziser werden. Und die Güte dieser Verbindungen könnte darüber bestimmen, wie gut wir in den einzelnen Altersabschnitten manche Dinge lernen. Ulléns Pianistenstudie zeigte noch etwas: Wer schon als Kind Klavier gespielt hatte, dessen weiße Substanz war im ganzen Gehirn vergleichsweise ausgeprägter. Wer erst im Erwachsenenalter damit angefangen hatte, wies nur im Vorderhirn Steigerungen auf – dort, wo die Myelinisierung noch mit über zwanzig zunimmt.

Zeitfenster für Lernen

Anscheinend hängt die Altersgrenze für den Erwerb mancher Fertigkeiten auch mit den Vorgaben dafür zusammen, wann die Axone der einzelnen Gebiete von Myelin umhüllt werden. Dafür gibt es Zeitfenster, so genannte kritische Phasen, in denen das Lernen gelingt oder zumindest leichtfällt. Nach der Pubertät lernt man Fremdsprachen nicht mehr akzentfrei. Ein Kind erfasst dagegen die richtigen Laute noch ohne Schwierigkeiten. Denn nur in der Kindheit formieren sich die Schaltkreise für die Sprachwahrnehmung gemäß den Höreindrücken. Später verlieren wir – vorher vorhandene – Verbindungen für Klänge, die in der Muttersprache nicht vorkommen. Evolutionsbiologisch gesehen ist das sinnvoll: Wozu sollte das Gehirn Ballast mitschleppen – der Laute betreffen würde, welche die ganze Kindheit über nie auftraten. Im Übrigen sind solche Zeitfenster auch ein Hauptgrund, weswegen sich Erwachsene von Gehirnverletzungen nicht so gut erholen wie Kinder.

Ein weiterer Aspekt betrifft Rückenmarksverletzungen. Die Frage ist ja, wie man durchtrennte Nervenfasern veranlassen könnte nachzuwachsen. Im Myelin fanden Forscher Proteine, die Axone daran hindern, sich zu verzweigen und neue Verknüpfungen auszubilden. Das erste Myelinprotein von mehreren, die dafür sorgen, dass ein junger Axonast sofort bei einem Kontakt mit solch einem Protein verkümmert, entdeckte der Hirnforscher Martin E. Schwab von der Universität und der ETH Zürich. Schaltet man dieses Molekül, heute Nogo-A genannt, bei Tieren mit Rückenmarksverletzung aus, können lädierte Verbindungen nachwachsen. Empfindungen und Motorik kehren zurück.

Stephen M. Strittmatter von der Yale University in New Haven (Connecticut) gelang es erstaunlicherweise, bei betagten Mäusen das Zeitfenster wieder zu öffnen, in dem sich Erfahrungen auf die Hirnverkabelung auswirken. Er blockierte Nogo-Signale und erreichte so, dass sich Verbindungen fürs Sehen neu formierten.

Manche dieser Resultate lassen sich allerdings bisher nicht gut mit anderen Beobachtungen vereinbaren. So heißt es einerseits, beim Menschen sei die Myelinisierung mit dem dritten Lebensjahrzehnt im Wesentlichen abgeschlossen. Andererseits verlautet, das Gehirn behalte bis ins Alter seine Plastizität. Wie passt das zusammen? Nachweislich kann geistiges Training noch jenseits der achtzig dazu beitragen, dass Alzheimer nicht so bald auftritt. Auch die Klugheit wächst angeblich im Lauf des Lebens – dank welcher Mechanismen? Hier müssen wir auf zukünftige Forschungsergebnisse warten. Ob sich auch bei älteren Tieren das Myelin verändert, hat bisher keiner untersucht. Befunde beim Menschen lassen vermuten, dass die Myelinisierung zumindest bis Mitte fünfzig anhält. Allerdings findet sie in diesem Alter nur noch in ganz schwachem Ausmaß statt.

So viel dürfte feststehen: Die weiße Substanz bildet eine wichtige Grundlage für das Erlernen von Fertigkeiten, die langes Training, wiederholtes Üben sowie das Zusammenspiel weit voneinander entfernter Gebiete der Großhirnrinde erfordern. Weil im Gehirn von Kindern in großen Bereichen Myelinscheiden erst entstehen, fällt ihnen Neues oft wesentlich leichter als etwa ihren Großeltern. Für nicht wenige geistige und sportliche Tätigkeiten gilt: Um Weltklasse zu erreichen, muss man früh anfangen. Das Gehirn, das Sie heute besitzen, haben Sie in der Jugend aufgebaut. Es entwickelte sich in Wechselwirkung mit der Umwelt, als die neuronalen Verbindungen erst ihre Hüllen erhielten. Nun kann man Dinge auf viele Weise lernen – auch später stehen dafür im Gehirn noch Wege offen. Doch Weltformat erreicht am Klavier, am Schachbrett oder auf dem Tennisplatz nur, wer wirklich früh anfing.

Später im Leben lernt das Gehirn anders, nun mehr auf Synapsenbasis allein. Theoretisch könnten die Nervenimpulse, die beim intensiven Üben auftreten, auch jetzt eine Myelinisierung der benutzten Fasern anregen. Vielleicht werden wir irgendwann das Zeitschema und die Mechanismen zur Bildung der weißen Substanz so gut verstehen, dass wir diese manipulieren können. Wüssten wir, welches Signal einer Gliazelle sagt, welche Nervenfaser sie umkleiden soll und welche nicht, so wären wir einen guten Schritt weiter. Die Antwort liegt in den Tiefen des Gehirns. ◁

R. Douglas Fields arbeitet als Neurobiologe bei den amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) am National Institut of Child Health and Human Development. Dort leitet er die Abteilung Entwicklung des Nervensystems und Plastizität. Zuletzt erschien von ihm bei »Spektrum der Wissenschaft« im November 2007 ein Artikel über den Elektrosinn der Haie.

Fields, R. D.: Myelination: An Overlooked Mechanism of Synaptic Plasticity? In: Neuroscientist 11(5), S. 528 – 531, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965705.

KÖNNTEN MENSCHLICHE GLIEDMASSEN NACHWACHSEN?

Ein amputiertes Bein komplett regenerieren – für Molche und Salamander ist das kein Problem. Forscher hoffen von ihnen zu lernen, wie das auch beim Menschen gelingen könnte.

In Kürze

- Zeitlebens ganze Körperteile originalgetreu nachwachsen zu lassen, ist eine **beneidenswerte Fähigkeit von Schwanzlurchen**.
- Die frühe Reaktion menschlicher Gewebe auf eine **Amputationsverletzung** unterscheidet sich noch nicht sehr von der eines Schwanzlurchs. Dann aber wird beim Menschen eine Narbenbildung eingeleitet, während der Lurch ein embryonales Entwicklungsprogramm reaktiviert, das den verlorenen Körperteil nachwachsen lässt.
- Gelänge es, das Milieu menschlicher Wunden so zu beeinflussen, dass sie ähnlich wie beim Schwanzlurch reagieren, wäre es denkbar, auch größere **Körperteile wiederherzustellen**.

Von Ken Muneoka, Manjong Han und David M. Gardiner

Die Gliedmaßen eines Molchs oder Salamanders mögen kleiner und ein wenig glitschiger sein als die des Menschen. In ihrem Aufbau jedoch sind sie ähnlich: außen Haut und innen Knochen, Muskeln, Bändern, Sehnen, Nerven und Blutgefäße, zusammengehalten durch einen lockeren Verbund von Bindegewebszellen, der dem Ganzen Kontur gibt. Nichts Aufregendes also, sollte man meinen – aber unter Wirbeltieren sind die Beine der Schwanzlurche, zu denen Molche und Salamander gehören, etwas ganz Besonderes. Denn nach einer Amputation wachsen die Gliedmaßen komplett wieder nach, und das selbst beim geschlechtsreifen Tier.

Schon den Froschlurchen – der nächsthöheren Wirbeltiergruppe mit den Kröten und Fröschen – gelingt dies nur als Kaulquappe, wenn sie ihre Beinchen entwickeln. Selbst ein Säugetierembryo kann seine so genannten Extremitätenknospen noch in gewissem Umfang regenerieren, diese Fähigkeit schwindet aber bereits lange vor der Geburt. Grob gesehen lässt die Regenerationsfähigkeit gewöhnlich mit fortschreitender individueller wie evolutionärer Entwicklung nach.

Wie ein »niederer« Schwanzlurch das Kunststück fertigbringt, zeit seines Lebens komplexe Körperteile nachwachsen zu lassen, interessiert Forscher schon lange. Woher »weiß« der gerade nachwachsende Abschnitt eines Glieds, wie viel von dem Ganzen verloren gegangen und nun zu ersetzen ist? Warum bildet die Haut keine Narbe, die den Stumpf beispielsweise beim Menschen definitiv versiegelt? Wie kann ein Schwanzlurch so spät noch auf embryonale Programme zurückgreifen, um ein Bein immer wieder von Grund auf neu entstehen zu lassen? Antworten darauf kristallisieren sich inzwischen heraus. Sobald wir verstanden haben, wie diese natürliche Regeneration funktioniert, können wir sie vielleicht – so die Hoffnung – eines Tages auch künstlich beim Menschen auslösen. Das lohnende Ziel immerhin lautet, aus einer Amputationswunde das nun Fehlende nachwachsen zu lassen und die Heilung anderer größerer Verletzungen zu revolutionieren.

Die Reaktion des menschlichen Gewebes auf schwere Verletzungen unterscheidet sich anfänglich kaum von der eines Schwanzlurchs, doch schon wenig später zeigen sich deutliche Abweichungen. Bei unserer Spezies kommt es nämlich im Zuge der Wundheilung zur Vernarbung des Gewebes, was letztlich eine Regeneration verhindert. Dennoch gibt es Anzeichen, dass auch im menschlichen Organismus durchaus noch das Potenzial schlummert, komplexe Körperteile wiederherzustellen. Man müsste es anzapfen und die menschliche Wundheilung lurchähnlicher machen können. Wie sich dies bewerkstelligen ließe, versuchten wir zunächst am Vorbild der natürlichen Experten zu studieren.

Wird einem Schwanzlurch ein Beinchen amputiert (bei all solchen Experimenten werden die Tiere narkotisiert), ziehen sich die Blutgefäße im Stumpf schnell zusammen, um den Blutverlust gering zu halten. Dann überwandern Oberhautzellen die Schnittfläche, decken sie zügig ab. Innerhalb der ersten Tage nach der Verletzung verwandelt sich diese

AARON GOODMAN

In vielleicht 20 Jahren möglich: eine lurchartige Wundheilung anzuregen und Körperteile wieder herzustellen

so genannte Wundepidermis in eine kappenartige Schicht von Signalzellen, die für eine erfolgreiche Regeneration unverzichtbar ist. In der Zwischenzeit lösen sich aus dem Maschenwerk des Bindegewebes einige seiner Erzeugerzellen und wandern der Amputationsfläche entlang ins Zentrum der Wunde. Dort vermehren sie sich und bilden ein Regenerationsblastem – eine knubbelige Anhäufung von Zellen mit Stammzellcharakter, die als Vorläuferzellen für das künftige neue Beinchen dienen (siehe Abbildung auf S. 52/53).

Ein fünftes Bein

Ein klassisches Studienobjekt hierfür ist der Axolotl, ein Querzahnmolch (siehe Randspalte S. 53). Schon vor Jahren wies die Arbeitsgruppe von Susan V. Bryant an der University of California in Irvine nach, dass die Blastemzellen des Tiers den Zellen der embryonalen Extremitätenknospe entsprechen. Anscheinend handelte es sich bei der Regeneration eines Beins praktisch um die Rekapitulation eines embryonalen Prozesses. Demnach sollte beiden Vorgängen das gleiche genetische Programm zu Grunde liegen. Und da der Mensch seine Extremitäten ebenfalls in der Embryonalphase ausbildet, würde auch er im Prinzip bereits über die nötigen Grundprogramme zur Regeneration von Gliedmaßen verfügen. Kurzum: Es schien, als müssten die Forscher nur noch herausfinden, wie man nach einer Amputation die Bildung eines Blastems in Gang setzt.

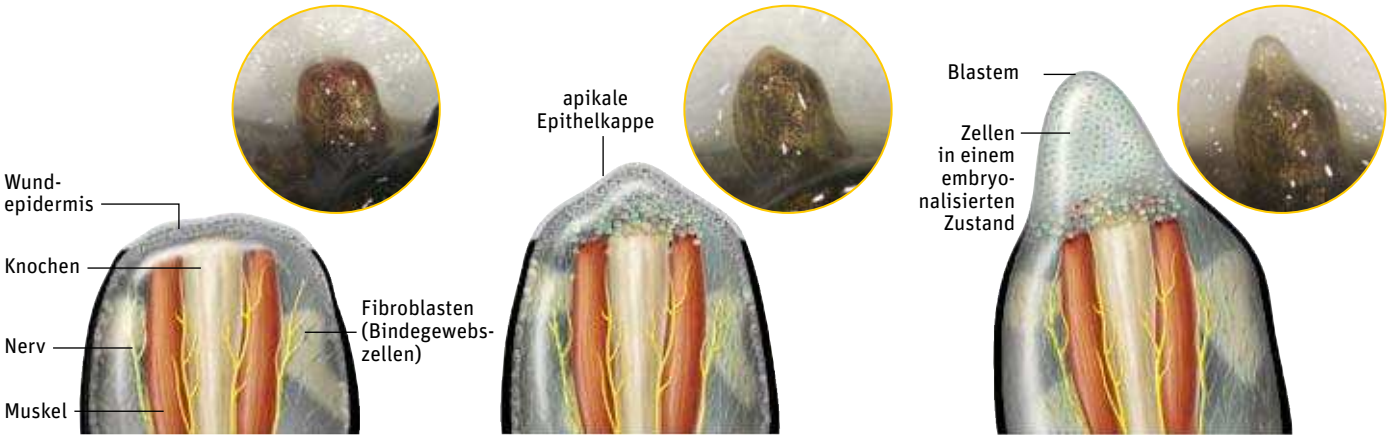
Eben das versuchte einer von uns (Gardiner) vor wenigen Jahren zusammen mit Tetsuya Endo an dieser Universität. Wir wählten einen stark vereinfachten Ansatz: Statt von echten Amputationsflächen, in denen ein Axolotl natürlicherweise ein Blastem ausbildet, gingen wir von einer kleinen, am Bein angebrachten Hautwunde aus, die eigentlich durch Regeneration der Haut ausheilt. Dahinter stand die Idee, dass solch eine harmlose Wunde beim Schwanzlurch insofern den Amputationsverletzungen bei Säugern ähnelt, als sich an ihr normalerweise auch keine neue Gliedmaße bildet. Man kann aber beim Axolotl ein zusätzliches Bein dort wachsen lassen, wo sonst bloß eine einfache Wundheilung abläuft, und das ermöglichte uns, den Regenerationsprozess und seine Voraussetzungen feiner zu analysieren.

Wie bei einer Amputationswunde wurde auch die kleine ausgeschnittene Hautfläche am Bein rasch von einwandernden Zellen der Oberhaut (der Epidermis) überdeckt und versiegelt. Zudem wanderten Fibroblasten genannte Zellen aus der bindegewebigen Leder- oder Unterhaut (der Dermis) ein, um diese fehlende Schicht zu ersetzen. Indem wir einen Nerv in das Wundgebiet umleiteten, konnten wir die Fibroblasten dazu bewegen, ein Blastem auszubilden. Schon vor über einem halben Jahrhundert hatte Marcus Singer von der Case Western Reserve University in Cleveland nachgewiesen, dass die Regeneration an einem Stumpf eine Innervation voraussetzt. Dies gilt auch für das Wachstum eines Zusatzbeins. Unsere Versuche machten aber klar, dass unbekannte, durch den umgeleiteten Nerv produzierte Faktoren die Regeneration beeinflussen, indem sie das Verhalten der örtlichen Fibroblasten verändern.

Ein Blastem in einer Hautwunde zu induzieren reicht allerdings nicht: Seine Entwick-

Wie ein Bein perfekt nachwächst

Schwanzlurche sind die einzigen Wirbeltiere, die zeitlebens verlorene Gliedmaßen und andere Körperteile immer wieder komplett nachwachsen lassen können. Wohl das bekannteste Studienobjekt für diese Fähigkeit ist der Axolotl, ein Querzahnmolch. Untersuchungen seiner Gliedmaßenregeneration zeigten, dass der Prozess mit dem raschen Wundverschluss und dem Einwandern



WUNDVERSCHLUSS
Innerhalb weniger Stunden nach einer Beinamputation wandern Zellen der Oberhaut (Epidermis) in die Wunde, verschließen sie und bilden eine Wundepidermis.

HEILUNGSSIGNALE
Epidermale Zellen verdichten sich zu einer Leiste, der so genannten apikalen Epithelkappe, die über chemische Signale das Verhalten anderer Zellen steuert. Fibroblasten- und Muskelzellen beginnen in das Wundgebiet einzuwandern.

UHR ZURÜCKDREHEN
Eingewanderte Zellen kehren in eine Art embryonales Stadium zurück und beginnen sich zu teilen, um ein so genanntes Blastem auszubilden – als »Knospe« für ein neues Bein.

lung schreitet nicht zu den späteren Regenerationsstadien fort, in denen sich ein zusätzliches Bein herausbildet. Dazu bedarf es einer weiteren Komponente: Es muss ein Stück Haut von der anderen Beinseite an den Wundrand verpflanzt werden, so dass auch Fibroblasten der anderen Seite am Heilungsprozess mitwirken können. Obwohl die zusätzliche Extremität an einer unnatürlichen Stelle wächst, sind ihre Teile anatomisch korrekt (siehe linkes Foto im Kasten S. 56).

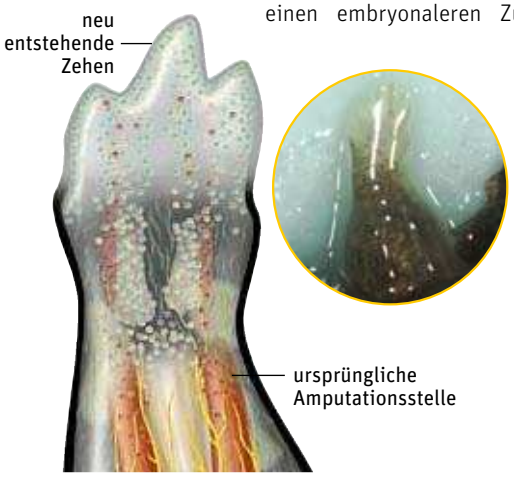
Das Grundrezept für ein funktionierendes Blastem scheint also verhältnismäßig einfach zu sein: eine Wundepidermis, Nerven sowie Fibroblasten von der Gegenseite der Extremität. Ausgehend vom diesem Minimalmodell der Gliedmaßenregeneration versuchten wir nun die Rolle der einzelnen Komponenten zu ergründen, mit Blick auch auf die Vorgänge im Embryo.

In einem ganz frühen Embryonalstadium bilden sich bekanntlich drei Lagen primitiver Zellen aus, die als Keimblätter bezeichnet werden. Die spätere Epidermis – die Oberhaut – leitet sich wie etliche andere Strukturen vom äußeren Blatt ab: dem Ektoderm. Es liefert auch Signale, die das Wachstum an den Extremitätenknospen lenken. Ektodermzellen sammeln sich nämlich in der Knospe und bilden eine so genannte Apikalleiste, die über vorübergehend erzeugte chemische Signale die Wanderung und Vermehrung der darunterliegenden Knospenzellen steuert.

Noch konnten nicht alle wesentlichen Signale von »oben« identifiziert werden, beteiligt sind aber jedenfalls Mitglieder aus der Familie der Fibroblasten-Wachstumsfaktoren (kurz FGFs, nach dem englischen Begriff). Die Apikalleiste produziert eine ganze Reihe dieser Proteine, die dann ihrerseits tiefer gelegene Knospenzellen dazu anregen, andere Fibroblasten-Wachstumsfaktoren zu erzeugen und rückzukoppeln. So entsteht ein Schaltkreis von Signalen, der für das erstmalige Wachstum einer Gliedmaße unabdingbar ist.

Eine vermutlich ähnlich funktionierende Rückkopplungsschleife kommt bei der Extremitätenregeneration durch die anfangs erwähnte kappenartige Deckschicht, die apikale Epithelkappe, in Gang. Wie Hiroyuki Ide von der Tohoku University in Japan feststellte, gelingt es Froschlarven, also Kaulquappen, mit nachlassender Regenerationsfähigkeit nicht mehr, den FGF-Signalkreislauf zu starten. Indem er regenerationsunfähige Amputationsstümpfe älterer Kaulquappen mit FGF-10 behandelte, konnte er diesen Kreislauf anwerfen und eine partielle Regeneration der Extremi-

bestimmter Zellen aus den Stumpfgeweben in das Wundgebiet beginnt. In den nächsten Stadien versetzen sich diese Zellen in einen embryonaleren Zustand zurück, und das neue Glied wächst nach dem gleichen Muster heran wie bei der Embryonalentwicklung.



GESTALT ANNEHMEN

Das Blastem wächst und beginnt die Kontur des neuen Glieds zu formen, einschließlich der Spitze, die später zum Fuß wird. Die embryonalisierten Zellen erzeugen neues Gewebe, indem sie sich vermehren und differenzieren, so dass Knochen, Muskeln, Bindegewebe und so fort entstehen.

VOLL AUSWACHSEN

Mit zunehmender Reifung der inneren Anatomie und der äußeren Form beginnt die Extremität auch in die Länge zu wachsen und ergänzt das fehlende Segment zwischen der ehemaligen Amputationsstelle und den Zehen.

FOTOS: DAVID M. GARDINER; ILLUSTRATIONEN: ALICE Y. CHEN

tät erreichen. Allerdings war deren Gestalt abnorm, mit irregulär angeordneten Teilen. Das wiederum warf die wichtige Frage nach dem Kontrollmechanismus auf, der eine Regeneration amputierter Teile anatomisch korrekt vonstattengehen lässt. Als dafür zuständig erwiesen sich dann die anderen wichtigen mitspielenden Zellen, die Fibroblasten.

Navigationshilfe für Zellen

Erinnern wir uns an das minimalistische Experiment, das zur Bildung einer zusätzlichen Gliedmaße führte. Die Anwesenheit von Fibroblasten per se reichte dazu nicht aus, denn auch die einfache künstliche Hautwunde enthielt ja schon solche Einwanderer, ohne dass ein Bein wuchs. Entscheidend war vielmehr das Mitwirken von Fibroblasten der anderen Beinseite, was anschaulich darlegt, wie bedeutsam die räumliche Position der Zellen im Körper für das Auslösen des Regenerationsprozesses ist.

Beim Embryo beginnt die Extremitätenentwicklung immer mit dem rumpfnahen Teil, also mit Schulter oder Hüfte. Sukzessive bilden sich körperfernere Strukturen, zum Schluss dann Finger oder Zehen. Bei Verlust eines Fußes etwa darf dagegen nicht das ganze Beinprogramm von vorne beginnen. Und in der Tat wachsen bei einem Schwanzlurch nur die verloren gegangenen Teile nach, egal in welcher Höhe man sein Bein amputiert hat. Diese flexible Reaktion bedeutet, dass Zellen am Wundrand »wissen« müssen, wo sie sich in Bezug zur gesamten Extremität befinden. Über solche Informationen zur jeweiligen Position werden die zellulären und molekularen Abläufe gesteuert, die eine perfekte anatomische Rekonstruktion der verlorenen Extremitätenteile ermöglichen.

Die Positionsinformation ist in Form des Aktivitätsmusters verschiedener Gene kodiert. Um die Kontrollmechanismen der Regenerationsstadien aufzudecken, ist es daher hilfreich zu untersuchen, welche Gene während der einzelnen Abläufe aktiv sind.

Während der Embryonalentwicklung wirken zwar zahlreiche Gene daran mit, den Zellen Informationen über ihre Position in der Extremität zu geben, doch ganz wesentlich ist dabei die Aktivität einer Genfamilie namens *Hox*. Bei den meisten Tieren nutzen die Zellen in der wachsenden Extremitätenknospe den Positionskode der *Hox*-Gene zur Ausformung der Gliedmaße. Wenn sie sich im weiteren Verlauf zu spezialisierten Geweben differenzieren, »vergessen« sie jedoch, wo sie herkommen. Anders bei einem geschlechtsreifen Schwanzlurch: Hier behalten die Fibroblasten der Extremitäten das Informationsystem »im Gedächtnis« und können zur Gliedmaßenregeneration auf den *Hox*-Positionskode zurückgreifen. Sie bringen ihre Informationen mit, wenn sie in das Wundgebiet einwandern und dort ein Blastem

AXOLOTL

Er gehört zu den **Querzahnmolchen**, auch Breitkopf-Querzahnmolche oder Breitkopfsalamander genannt. Verwandt sind diese mit den Echten Salamandern und Molchen, bilden aber **eine eigene Gruppe**.

Axolotl **bleiben zeitlebens larvenähnlich** und werden in dieser Form geschlechtsreif. Fachlich heißt dies Neotenie. Durch **Hormongabe** lassen sie sich aber in die Erwachsenenform umwandeln, die an Land geht.

bilden. Im Blastem kommunizieren die Zellen miteinander und bestimmen dabei das Ausmaß des Schadens. Der Inhalt dieser Konferenz ist noch weit gehend unbekannt. Ein Ergebnis jedenfalls besteht darin, dass die regenerierende Extremität zunächst ihren Umriss einschließlich der Konturen von Vorder- oder Hinterfuß festlegt, so dass die Zellen dann entsprechend ihrer Positionsdaten die fehlenden Strukturen zwischen Amputationsfläche und Fingern oder Zehen ergänzen können.

Da Extremitäten hauptsächlich aus Muskeln und Knochen bestehen, interessieren wir uns besonders für die Herkunft dieser Gewebe und für die Mechanismen ihrer Entstehung. Eines der Schlüsselereignisse zu Beginn der Regeneration ist der bislang kaum verstandene Prozess der Ent- oder Dedifferenzierung. Dieser Begriff bezeichnet typischerweise die Rückkehr reifer, spezialisierter Zellen in einen primitiveren, fast embryonalen Zustand, der es ihnen ermöglicht, sich rasch zu vermehren und als Vorläufer eines oder mehrerer Gewebetypen zu dienen.

In die Regenerationsforschung wurde der Begriff auf Grund einer frühen Beobachtung eingeführt: Unter dem Mikroskop schien es so, als würde sich das Gewebe, insbesondere die Muskulatur, im Amputationsstumpf auflösen und teilungsfähige Zellen hervorbringen, die dann das Blastem bilden. Heute wissen wir, dass diese mit Muskeln assoziierten Zellen sich von Stammzellen ableiten, die hier schon normalerweise residieren.

Ob es bei der Gliedmaßenregeneration nun in jedem Gewebetyp wirklich zu einer Dedifferenzierung kommt oder nicht, ist zwar noch zu beweisen – doch zumindest treten im Lauf der Regeneration Variationen dieses Prozesses auf. Fibroblasten zum Beispiel, die in den Blastembereich einwandern und zu primitiven Blastemzellen werden, können sich dann ebenso zu Knochen- und Knorpelgewebe wie auch wieder zu Fibroblasten differenzieren, die das bindegewebige lockere Maschenwerk in einer neuen Extremität bilden werden.

Bei den epidermalen Zellen, einem anderen zentralen Akteur bei der Blastembildung, gibt es ebenfalls Momente, in denen sie ein Stück weit in einen embryonalen Zustand zurückzukehren scheinen. Eine ganze Reihe von Genen, die im embryonalen Ektoderm aktiv sind, beeinflussen die Extremitätenentwicklung, darunter *Fgf8* und *Wnt7a*. Sobald sich das embryonale Ektoderm jedoch weiter differenziert und die reife mehrschichtige Epidermis bildet, werden diese Gene ausgeschaltet.

Während des Regenerationsprozesses beim geschlechtsreifen Tier zeigen epidermale Zellen, die über die Amputationsfläche wandern und die Wundepidermis bilden, anfangs ebenfalls eine bestimmte Genaktivität – doch die hat nicht spezifisch mit der Regeneration zu tun. Zum Beispiel produzieren sie so Keratinproteine zur Wundheilung. Erst später aktivieren die Zellen der Wundepidermis *Fgf8* und *Wnt7a*, also die beiden bei der Gliedmaßenentwicklung bedeutsamen Gene. Unter praktischen Gesichtspunkten ist somit zumindest für Epidermiszellen und weitere Zelltypen eine Dedifferenzierung im Wesentlichen definiert als die spezifische Reaktivierung von entscheidenden Entwicklungsgenen.

Wie unsere Studien am Axolotl zeigen, lässt sich der Regenerationsprozess in drei Schlüsseletappen unterteilen: die Wundheilungsreaktion am Anfang, gefolgt von der Ausbildung des Blastems durch Zellen, die sich ein Stück weit embryonalisiert haben, und schließlich den Start eines Entwicklungsprogramms für die neue Extremität. Auf diesen Erkenntnissen bauen wir auf, um der angestrebten Wiederherstellung von Gliedmaßen beim Menschen näher zu kommen.

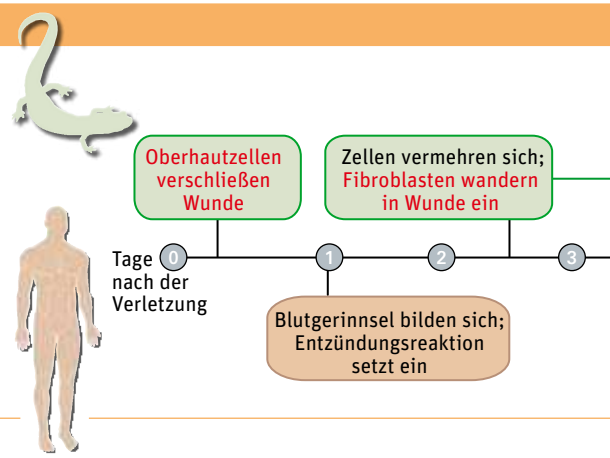
Immerhin ist es nicht so, dass unserer Spezies jegliche Regenerationsfähigkeit abgeht. So können unsere Fingerkuppen bereits natürlicherweise nachwachsen – einer der ermuti-

KEN MUNEOKA

Wenn sich beim Mäusefötus die Pfoten entwickeln, produzieren die Zehen einen Wachstumsfaktor namens BMP4, hier violett eingefärbt. Dieses Protein ist später auch bei der natürlichen Regeneration einer Zehenspitze unverzichtbar.

Unterschiedliche Heilungsprozesse

Bei Säugern reagieren die Zellen auf eine schwere Verletzung wie eine Amputation bis zu einem gewissen Grad ähnlich wie bei Schwanzlurchen (rote Schrift). Die Heilung verläuft jedoch deutlich langsamer und beschränkt sich wegen fehlender Signale vom Umfeld, die eine Regeneration begünstigen, auf den Verschluss der Wunde mit Schorf und dann Narbengewebe. Bei Schwanzlurchen verschließt sich die Wunde hingegen schon binnen Stunden, ohne dass eine Narbe entsteht. Die Zellen beginnen innerhalb weniger Tagen mit der Rekonstruktion fehlender Strukturen, angeregt durch Signale untereinander und vom umgebenden Milieu. Während menschliche Hautzellen noch dabei sind, die Wunde zu verschließen, bildet der Schwanzlurch schon ein Blastem für die Regeneration.



gendsten Hinweise, dass dies mit geeigneter Nachhilfe auch bei größeren Körperteilen nicht unerreichbar sein dürfte. Über die Regeneration von Fingerspitzen wurde erstmals vor mehr als 30 Jahren bei kleinen Kindern berichtet, inzwischen aber auch bei Jugendlichen und sogar Erwachsenen.

Um die Regeneration dieses Abschnitts nach einer Amputationsverletzung zu fördern, genügt es, die Wunde zu reinigen und einen einfachen Verband anzulegen. Bei ihrem natürlichen Heilen stellt die Fingerspitze zunächst ihre Kontur, ihre Fingerbeere und ihr Empfindungsvermögen wieder her, um dann in unterschiedlicher Länge nachzuwachsen. Erfolge dieser nichtchirurgischen Behandlung sind in der medizinischen Literatur tausendfach dokumentiert.

Alte Therapie kontraproduktiv

Die typische Alternative besteht darin, den Defekt mit einem Hautlappen zu übernähen, der die Amputationswunde verschließt. Interessanterweise ist dies eine Maßnahme, die – wie wir inzwischen wissen – sogar beim Schwanzlurch eine Regeneration verhindert, da sie die Ausbildung der Wundepidermis stört. Wir Menschen besitzen offenbar ein regeneratives Potenzial, das wir leider mit manchen unserer konventionellen Behandlungsmethoden unterdrückt haben.

Da wir kaum die Fingerkuppen menschlicher Probanden zur Erforschung der natürlichen Regeneration amputieren konnten, wichen wir auf Mäuse aus. Dort hatten mehrere Wissenschaftler das Phänomen bei jungen und erwachsenen Tieren nachgewiesen. In den letzten Jahren haben daher zwei von uns (Muneoka und Han) die regenerativen Prozesse nach Amputationen von Zehenspitzen bei den Nagern genauer unter die Lupe genommen. Auch diese bildeten eine Wundepidermis, die allerdings die Schnittfläche weitaus langsamer überzog als beim Axolotl. Wir wiesen ferner nach, dass während der Regeneration im Wundbereich wichtige embryonale Gene aktiv sind, und zwar in einer Population undifferenzierter teilungsaktiver Zellen – was anzeigt, dass es sich um Blastemzellen handelt. Und aus indirekten Hinweisen ist zu schließen, dass sie sich von Fibroblasten aus dem interstitiellen Bindegewebe und dem Knochenmark ableiten.

Um die Rolle spezifischer Gene und Wachstumsfaktoren bei diesen Prozessen genauer zu studieren, entwickelten wir eine Gewebekultur mit explantiertem Material, die als Modell für die Regeneration von Zehenspitzen bei Mäuseföten dient. Wenn wir darin der fötalen Amputationswunde experimentell den Wachstumsfaktor BMP4 (englisch *bone morphogenetic protein* 4) entzogen, wurde die Regeneration gehemmt. In der fötalen Zehenspitze ist ein Gen namens *Msx1* beziehungsweise sein Protein zur Produktion dieses Wachstumsfaktors erforderlich. Auch eine Mausmutante, der das Gen fehlt, erwies sich als unfähig, ihre Zehenspitzen zu regenerieren. Als wir der Amputationswunde einer solchen Maus den Faktor zuführten, kam eine Regeneration in Gang, was seine Notwendigkeit dafür bestätigte.

Studien von Cory Abate-Shen und ihren Kollegen an der Robert Wood Johnson Medical School zeigten auch, dass das Protein von *Msx1* während der Embryonalentwicklung die Differenzierung einiger Zelltypen hemmt. Dieser Zusammenhang mit der Differenzierungskontrolle legt nahe, dass das Protein bei der Regeneration eine Entdifferenzierung veranlasst. Zwar ist das *Msx1*-Gen beim Axolotl in der frühen Dedifferenzierungsphase der Extremitätenregeneration nicht aktiv. Doch sein Schwestergen *Msx2* wird als eines der ersten reaktiviert und erfüllt sehr wahrscheinlich eine ähnliche Funktion.

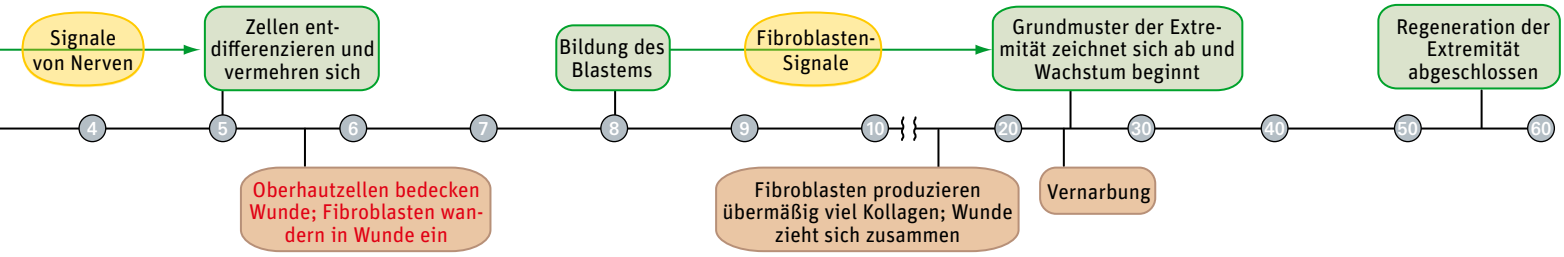
Eine amputierte menschliche Extremität nachwachsen zu lassen – das mag zwar noch immer wie Fantasterei anmuten. Aber anhand der beschriebenen und weiteren Erkenntnisse können wir inzwischen beurteilen, mit wel-

ÜBRIGENS

➤ Dieser junge Alligator, ein Reptil, regeneriert gerade teilweise seinen Schwanz, der ungefähr so dick ist wie eine menschliche Extremität. Die **Größe einer Amputationsfläche** scheint wohl kein prinzipielles Hindernis für das Nachwachsen eines Körperanhangs zu sein.

➤ Die volle Regeneration einer menschlichen Extremität eines, sagen wir, 20-Jährigen dürfte einmal weniger Zeit brauchen als 20 Jahre. Bei Schwanzlurchen zumindest erlaubt **ein bisher wenig verstandenes Aufholphänomen**, dass ein sich regenerierendes Körperteil eine Phase besonders schnellen Wachstums durchläuft und schließlich zur Gesamtgröße des Tieres richtig proportioniert ist.

FOTO: CAROL BURDSAL; AUS: MANJONG HAN ET AL., LIMB REGENERATION IN HIGHER VERTEBRATES, IN: ANATOMICAL RECORD PART B: THE NEW ANATOMIST, NOV. 2005, BD. 287 B, NR. 1



ALICE Y. CHEN

Auf dem Weg zur menschlichen Regeneration

Schrittweise nähern sich Wissenschaftler dem Ziel, menschliche Gliedmaßen zu rekonstruieren. An Schwanzlurchen wie dem Axolotl, die abgetrennte Extremitäten natürlicherweise regenerieren, untersuchen sie zunächst, wie dieser Prozess gesteuert wird. Und sie lernen daraus, wie sich ähnliche Abläufe bei Tieren in Gang setzen ließen, die größere Körperteile normalerweise nicht wiederherstellen können. Um das regenerative Potenzial beim Menschen zu aktivieren, muss höchstwahrscheinlich unser Wundheilungsprozess umdirigiert werden – von der Narbenbildung zu einem Programm, das ähnliche Instruktionen beinhaltet wie bei der Extremitätenentwicklung in der Fötalphase.

DAVID M. GARDINER

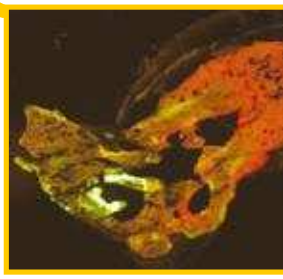
UMGELENKTE WUNDHEILUNG

Durch bestimmte Manipulationen bei einem Axolotl gelingt es, aus einer flachen Wunde am Vorderbein ein zusätzliches Bein wachsen zu lassen. An diesem Modell wurden die Grundvoraussetzungen ermittelt, um die Regeneration einer Extremität künstlich anzuregen, wo normalerweise nur eine einfache Wundheilung stattfindet.

KEN MUNEOKA

NICHT REGENERATIONSFÄHIGES WIRBELTIER

Ein normales Sprunggelenk und ein Fuß wachsen aus dem »Ellenbogen« eines Hühnerembryos (oben rechts), nachdem man ihm Gewebe aus einem Bein in die Flügelknospe transferiert hat. Wie dieses Nachwachsen aus einem amputierten Beinsegment zeigt, kann bei einem Tier, das normalerweise keine Extremitäten regeneriert, das Entwicklungsprogramm reaktiviert werden, wenn das Wundmilieu es zulässt.



KEN MUNEOKA

chen plausiblen, logischen Schritten wir dem Ziel näher kommen dürften.

Die Amputation einer menschlichen Extremität hinterlässt eine große, komplexe Wunde, die verschiedene Gewebe durchtrennt: Ober- und Lederhaut (Epidermis und Dermis), Binde- und Fettgewebe, Muskeln, Knochen, Nerven und Gefäße. Die meisten dieser Gewebe sind für sich betrachtet bei kleinräumigen Verletzungen sehr wohl zur Regeneration fähig. Nur die Dermis nicht. Sie enthält unter anderem einen erheblichen Anteil an Fibroblasten, also eigentlich die Akteure, die bei der regenerativen Zellantwort der Schwanzlurche eine so zentrale Rolle spielen. Beim Menschen und anderen Säugern verhalten sich diese Zellen aber anders: Im Zuge der Wundheilung lagern sie ein ungeordnetes Netzwerk von extrazellulärem Material ab und bilden so schließlich ein Narbengewebe. Der Prozess, Fibrosierung genannt, ist der auffälligste Unterschied zur regenerativen Heilung bei Schwanzlurchen. Er behindert bei Säugern nicht nur die Regeneration, sondern kann nach Verletzung oder Erkrankung eines Organs auch schwere Gesundheitsprobleme verursachen, etwa durch dauerhafte und fortschreitende Funktionseinschränkungen von Leber oder Herz.

Untersuchungen an tiefen Wunden zeigten, dass während der Heilung mindestens zwei Gruppen von Fibroblasten einwandern. Denn ein Teil stammt aus der Lederhaut, der andere leitet sich von fibroblastenartigen Stammzellen ab, die im Blut kreisen. Angelockt werden sie beide durch Botenstoffe von Immunzellen, die an den Ort des Geschehens geeilt sind. Dort angekommene Fibroblasten breiten sich aus, vermehren sich und erzeugen schließlich die modifizierte extrazelluläre Matrix. Diese frühe Phase ist eigentlich nicht so verschieden von der regenerativen Reaktion eines Schwanzlurchs. Menschliche Fibroblasten erzeugen allerdings mehr extrazelluläres Matrixmaterial, das sich zudem mit der Reifung des Narbengewebes übermäßig vernetzt. Beim Schwanzlurch hingegen beenden die Fibroblasten ihre Matrixproduktion, sobald die normale Architektur wiederhergestellt ist.

Doch selbst bei den Säugern gibt es eine Ausnahme: Hautwunden beim Fötus heilen ohne Narbe ab. Die hier noch perfekt regenerierte Haut verrät, dass erst mit ihrer Reifung auf Fibrosierung umgeschaltet wird.

Man könnte nun annehmen, das neue Verhalten sei auf veränderte biologische Eigenschaften der Fibroblasten selbst zurückzuführen. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass es durch veränderte extrazelluläre Signale aus dem Wundmilieu zu Stande kommt, welche die Reaktion der Fibroblasten beeinflussen. Möglicherweise ließe sich also durch ein Modifizieren dieser Signale die Wundheilung umdirigieren. Da sich allerdings amputierte ganze Gliedmaßen selbst im Fötalstadium bei Säugern nicht regenerieren, kann eine narbenfreie Wundheilung zwar dafür nötig sein, aber allein nicht ausreichen, um eine erfolgreiche Regeneration in Gang zu setzen.

Brockes, J. P., Kumar, A.: Appendage Regeneration in Adult Vertebrates and Implications for Regenerative Medicine. In: Science 310, S. 1919 – 1923, 23. Dezember 2005.

Gardiner, D. M.: Ontogenetic Decline of Regenerative Ability and the Stimulation of Human Regeneration. In: Rejuvenation Research 8(3), S. 141 – 153, 1. September 2005.

Han, M. et al.: Limb Regeneration in Higher Vertebrates: Developing a Roadmap. In: Anatomical Record Part B: The New Anatomist 287B(1), S. 14 – 24, November 2005.

Stocum, D. L.: Regenerative Biology and Medicine. Academic Press, 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965708.

AP PHOTO, AL BEHRMAN

DAS MENSCHLICHE POTENZIAL

Die natürliche Regeneration menschlicher Fingerspitzen ist gut dokumentiert. Bei Lee Spievak heilte der Mittelfinger, nachdem der laufende Propeller eines Modellflugzeugs ein Stück des Endglieds abgetrennt hatte. Die Verletzung war mit einem Proteinpulver behandelt worden, das dem nachwachsenden Gewebe als Gerüst gedient und so die Regeneration begünstigt haben könnte.

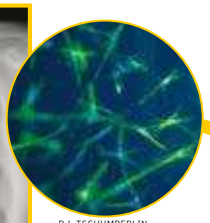
WIEDERAUFBAU VON EXTREMITÄTEN

Die meisten menschlichen Gewebe sind für sich genommen regenerationsfähig. Daher scheint die Rekonstruktion komplexer Körperteile keine Utopie zu sein. Es gilt, die Signale im Wundgebiet so zu modifizieren, dass die Hindernisse für ein Nachwachsen fallen und die Zellen unser fötales Programm zur Extremitätenbildung reaktivieren.

ZEHENSPITZE EINES SÄUGETIERS

Neuer Knochen (rot) entsteht am Amputationsstumpf (grün) der Zehenspitze einer Maus. Dies belegt, dass auch Säugetiere ein regeneratives Potenzial besitzen. Wie die Autoren nachwiesen, bildet sich dort, wo die Zehe nachwachsen wird, bei der Maus zunächst ebenfalls ein Blastem.

PHOTO RESEARCHERS / LIVING ART ENTERPRISES



D.J. TSCHUMPERLIN UND L.Y. LEUNG, HSPH

GETTY IMAGES / AFP, JIM WATSON

STOP DER FIBROSE

Die Aktivität von Fibroblasten (grünlich gefärbte Zellen im Ausschnitt), die in einer Wunde Narbengewebe bilden, kann krankheitsbedingt auch zur Vernarbung von Organen führen. Das ist etwa bei der Lungenfibrose (oben) der Fall, die das Atmen stark beeinträchtigt. Wenn es gelänge, die Narbenbildung an einem Amputationsstumpf zu verhindern (und damit einen ersten Schritt in Richtung Extremitätenregeneration zu machen), sollten sich auch unerwünschte Fibrosierungen in anderen Geweben des menschlichen Körpers aufhalten lassen.

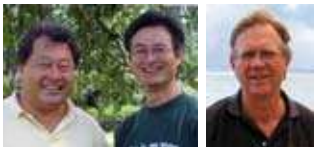
Um besser zu verstehen, wie man menschliche Gliedmaßen rekonstruieren könnte, unternehmen wir weitere Experimente an Mäusen. Ein natürliches Blastem haben wir bei einer Amputationsverletzung der Zehenspitze einer Maus schon beschrieben. Nun wollen wir versuchen, so etwas an einer Stelle zu induzieren, an der es normalerweise nicht auftritt – analog dem Axolotl-Experiment mit dem zusätzlichen Bein an einer flachen Wunde. Wenn dies gelänge, so hätten wir damit die minimalen Erfordernisse für die Bildung eines Blastem bestimmt. Diese Untersuchungen werden hoffentlich auch unsere Vermutung bestätigen, dass von ihm selbst entscheidende Signale ausgehen, die eine Fibrosierung der Wunde verhindern.

Vom Mäusezeh zum Menschenbein

Bei Erfolg wäre das nächste große Etappenziel, einen vollständigen Mäusezeh an seiner Amputationsfläche nachwachsen zu lassen. Da er auch Gelenke beinhaltet, die zu den kompliziertesten der beim Embryo entstehenden Skelettkomponenten gehören, ist diese Aufgabe weitaus anspruchsvoller als das Regenerieren einer einfachen Zehenspitze. Noch ist nicht im Einzelnen geklärt, wie sich Gelenke natürlicherweise entwickeln. Daher wäre die gelungene Regeneration eines kompletten Mäusezehs, inklusive Gelenke und aller übrigen Strukturen, ein bedeutender Meilenstein auf dem Gebiet der Extremitätenregeneration. Wir hoffen, dieses Ziel in den nächsten Jahren zu erreichen. Danach erscheint die Aussicht auf die Rekonstruktion einer gesamten Mauspfote und dann eines vollständigen Beins nicht mehr allzu fern.

Und wann wird das bei menschlichen Körperteilen möglich sein? Die verblüffende Antwort: angesichts der Erkenntnisse zur Wundheilung und Regeneration, die wir bis dahin aus den verschiedenen Tiermodellsystemen gewonnen haben, vielleicht schon in ein bis zwei Jahrzehnten. Das auffallend unterschiedliche Verhalten der Fibroblasten von Schwanzlurchen und Säugetieren – dort steuern der Regenerationsreaktion, hier fibrotische Reaktion mit Vernarbung – lässt vermuten, dass der Schlüssel zu einer erfolgreichen Extremitätenregeneration bei diesen Zellen liegt.

Ebenso ermutigend ist ein Forschungsergebnis, über das Howard Y. Chang und John L. Rinn von der Stanford University vor Kurzem berichteten. Sie stellten fest, dass sich zumindest reife menschliche Fibroblasten – genau wie die von Schwanzlurchen – noch an das räumliche Koordinatensystem »erinnern«, das in der frühen Embryonalphase für die Verwirklichung des Körperbauplans benötigt wurde. Wie geschildert ist die Positionsinformation für die Regeneration von Körperteilen beim Schwanzlurch unentbehrlich. Ihr Vorhandensein bei menschlichen Fibroblasten erhöht die Chancen, auch unsere embryonalen Entwicklungsprogramme anzapfen und zu Regenerationszwecken nutzen zu können. ◁



Ken Muneoka (links), **Manjong Han** und **David M. Gardiner** (rechts) arbeiten an einem Netzwerk-Projekt zur Regeneration von Körperteilen bei Säugetieren. Die von Muneoka geleitete Forschergruppe ist eines von nur zwei Teams, denen die Defense Advanced Research Projects Agency der USA ein Budget von mehreren Millionen Dollar zur Verfügung stellte, um auf eine Gliedmaßenregeneration beim Menschen hinzuarbeiten. Muneoka ist Professor, Han Assistent Professor an der Tulane University, New Orleans. Gardiner forscht an der University of California in Irvine.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

SUPER-GESCHMACKSVERSTÄRKER

Neue Modulatoren, der Nahrung in winzigen Mengen zugesetzt, sollen kalorienreiche oder würzige Lebensmittelprodukte vortäuschen – damit wir gesünder essen.

In Kürze

- **Die neuen Geschmacksmodulatoren** sind kleine Moleküle, die den Geschmackseindruck von Nahrungsmitteln verstärken. Damit wirkt das Essen zum Beispiel süß, salzig oder herzhaft, ohne dass es entsprechend viel Zucker, Salz oder Glutamat enthält.
- Firmen erproben einige solche Modulatoren schon. Indem sie **Diätprodukten einen besseren Geschmack** verleihen, sollen sie die Menschen dazu bringen, weniger Kalorien zu sich zu nehmen.

Von Melinda Wenner

Süßes, Herzhaftes und Salziges isst der Mensch von Natur aus liebend gern. Der Körper verlangt danach, denn Speisen, die so schmecken, liefern ihm Energie, Proteine und Elektrolyte. Doch industriell gefertigte Nahrungsmittel verführen unter anderem dazu, zu viel Zucker- und Salzhaltiges zu verzehren – mit den bekannten Gesundheitsfolgen.

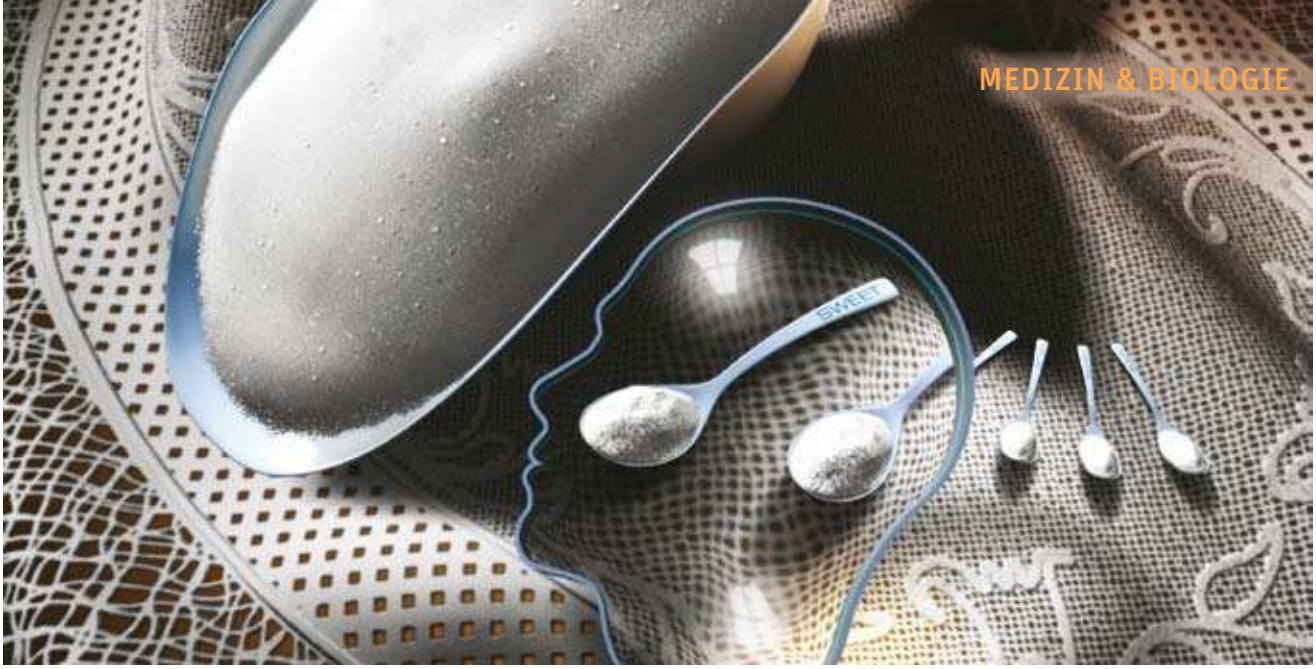
Wäre es nicht geschickt, dem Gehirn den Gehalt der begehrten Substanzen im Essen nur vorzugaukeln? Mit winzigen Mengen kleiner Moleküle, welche die Sinnesempfindung täuschen? Genau das strebt die neue Forschungsrichtung »Geschmacksmodulation« an. In den letzten Jahren konnten Wissenschaftler endlich einige alte Rätsel der Biologie des Schmeckens aufklären. Nun möchten sie Stoffe entwickeln, die Zunge und Gaumen beschwindeln. Wenn Hersteller herkömmlichen Lebensmitteln nur Spuren von spezifischen Modulatoren zusetzten, müssten sie weniger Zucker, Salz oder Glutamat verarbeiten – so die Idee.

An der Front der neuen Technologie steht das Unternehmen Senomyx im kalifornischen San Diego. Die Firma kooperiert bereits mit großen Lebensmittelkonzernen. Seit dem letzten Jahr verwendet Nestlé bei Fleischbrühen Modulatoren von Senomyx. In einigen Monaten möchten Coca-Cola und Cadbury Produkte der Firma einsetzen.

Senomyx entwickelt auch Hemmstoffe für Bitteres. Diese könnten helfen, das Nahrungsspektrum der Weltbevölkerung zu erweitern oder vorhandene Quellen ausgiebiger zu nutzen. Ließe sich etwa der Nachgeschmack von Sojaprotein ausblenden, könnte der Rohstoff in größerem Ausmaß als bisher genutzt werden und mehr Menschen ernähren.

Nicht nur brächte die Neuerung den Lebensmittelherstellern Einsparungen, denn die neuen Substanzen kosten nicht viel, wenn man die bisher benötigten Mengen an Zucker, Salz und anderen Zutaten gegenrechnet, die den Geschmack heben. Wichtiger ist: Solche Geschmacksmodulatoren könnten unserer Gesundheit nützen. Was uns schmeckt, täte uns dann auch gut.

Die Anfänge dieser Forschungen liegen mehr als zehn Jahre zurück. Schon damals zeigten Studien, dass manche Vorstellungen über die Geschmackswahrnehmung nicht stimmten. Der Mensch unterscheidet nach Ansicht vieler heutiger Wissenschaftler die fünf Geschmacksqualitäten: süß, salzig, bitter, sauer und herzhaft/würzig (worunter das japanische *umami* fällt, das unter anderem von Glutamat herrührt und Proteine anzeigt). Als sicher gilt nun auch: Auf der Zunge existieren nicht etwa getrennte Zonen für diese Empfindungen. Denn jede Geschmacksknospe im Mund vermag mit ihren Sinneszellen alle Geschmackskomponenten zu erfassen (siehe Kasten S. 60). Die Frage war aber, wie die kleine Gruppe von Sinneszellen innerhalb einer Geschmacksknospe sich die Arbeit teilt. Mitte der 1990er Jahre herrschte die Ansicht vor,



NICK ROTONDO

Aus wenig viel machen – das versprechen die neuen Geschmacksverstärker.

jede einzelne der Sinneszellen würde jede Geschmacksqualität erkennen können.

Das leuchtete Charles Zuker von der University of California in San Diego nicht ein. Der Molekulargenetiker und Neurobiologe, der auch am Howard Hughes Medical Institute arbeitet, fand es von der Evolution her gesehen unsinnig, dass dieselbe Sinneszelle sowohl Süßes wie Bitteres vermelden sollte, also gute Nahrung und auch Gifte – das eine erwünscht und anzustreben, das andere gefährlich und zu meiden. Nun können zwar allgemein Sinneszellen oft gegensätzliche Reize unterscheiden. Doch bei jedem unserer Sinne gibt es viele Zellen, die vor allem auf eine bestimmte Reizsorte ansprechen, in der Haut etwa Temperatursensoren, die nur bei einem bestimmten Wärmebereich reagieren. Wieso sollte das beim Geschmack anders sein?

Enthielten die Geschmacksknospen vielleicht doch, so fragte sich Zuker, spezielle Zellen für die Komponente süß, andere für salzig, wieder andere für Bitterstoffe und so fort? Die Forscher wussten einfach noch zu wenig über die molekularen Prozesse in den Geschmacksknospen und ihren Sinneszellen.

Süßverächter halfen weiter

Selbst darüber, wie die Stoffe im Essen mit Molekülen auf den Sinneszellen reagieren, war fast nichts bekannt. Zuker vermutete, es müsse für die Geschmacksqualitäten jeweils eigene Sensoren – so genannte Rezeptoren – geben, also für Bitteres andere Erkennungsmoleküle als für Zucker, für Saures andere als für Salziges. Sollte das zutreffen, könnte man die Rezeptoren vermutlich auch gezielt mit falschen Substanzen täuschen.

Noch war es niemandem gelungen, die Rezeptoren überhaupt zu isolieren. Ein Forscherteam in San Diego nahm sich Geschmackszellen aus der Zunge von Mäusen vor. Und zwar ermittelten die Wissenschaftler, welche Gene darin jeweils für Proteine abgelesen wurden, somit aktiv waren. Dabei stießen sie auf Gene für zwei noch unbekannte Proteine. Ihrem Aussehen nach mussten diese Moleküle eine Erkennungsfunktion auf der Zelloberfläche haben. Waren das Geschmacksrezeptoren? Zuker nannte sie später T1R1 und T1R2 (nach englisch *taste* – Geschmacks – *receptor*).

Doch es gelang zunächst nicht, die Bedeutung der neuen Moleküle nachzuweisen. Offensichtlich konnten beide auf sich allein gestellt nicht als Erkennungsmolekül reagieren, bildeten also für sich wohl keinen kompletten Rezeptor. Weiter kam Zuker erst, als ihm einfiel, dass manche Mäuse auf Grund eines genetischen Defekts Süßes nicht besonders gern naschen. Als die Forscher dem nachgingen, entdeckten sie ein weiteres potenzielles Rezeptormolekül, T1R3. Das Gen für eben dieses Molekül war bei den Süßverächtern unter den Mäusen mutiert. Die Gegenprobe zeigte tatsächlich: Wurde eine normale Kopie des Gens in die Sinneszellen eingeschleust, dann gierten auch diese Tiere nach Süßem.

Weitere Studien enthüllten schließlich den Bau und die Funktionsweise der Rezeptoren für süß und für herzhaft. Beide bestehen jeweils aus zwei Proteinen: der Süßrezeptor aus T1R2 und T1R3, der Umamirezeptor aus T1R1 und T1R3. Bald darauf fanden sich auch die Untereinheiten des Bitterrezeptors. Davon existieren 25 Varianten, wohl in Anpassung an die Vielzahl von Giftstoffen in der Natur. Beim Rezeptor für Saures wurden die Forscher ebenfalls fündig. Wie vermutet, besitzt die einzelne Sinneszelle diesen Studien zufolge tatsächlich jeweils nur die Erkennungsstrukturen für eine Geschmacksqualität.

Solche Befunde lieferten nicht nur grundsätzliche Erkenntnisse über den Geschmackssinn. Denn Zuker sah voraus, dass sich nun

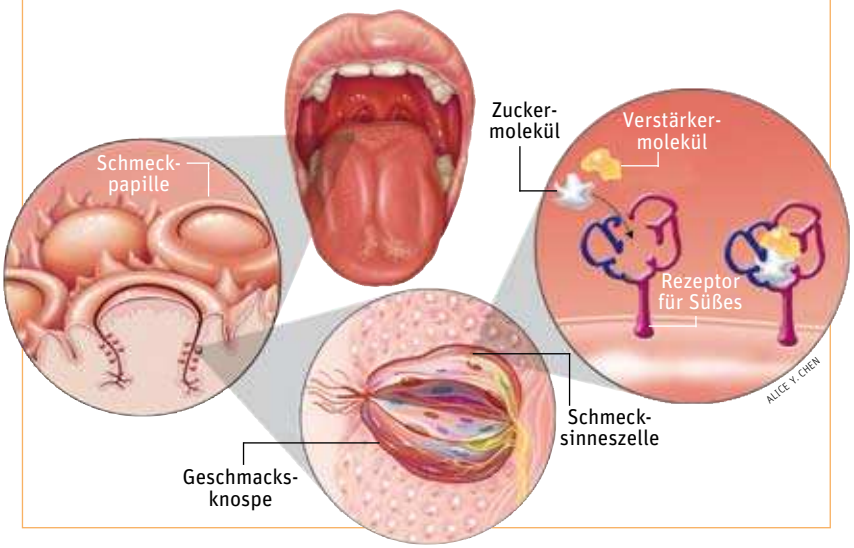
UMAMI – IMMER NOCH SCHWER ZU GREIFEN

Zwar wissen die Forscher von dieser Geschmacksqualität seit hundert Jahren. Doch immer noch erkennt sie nicht jeder als eigene Ausprägung an. Das Wort *umami* stammt aus dem Japanischen. Es heißt übersetzt »wohlschmeckend« und bezeichnet die herzhafte Komponente, die typischerweise Fleisch, Käse, Brühen und überhaupt proteinreiche Nahrung aufweisen.

Mehr Geschmack als Inhalt

Schmecksinneszellen liegen stets zu mehreren in so genannten Geschmacksknospen, die in großer Zahl in den Papillen auf der Zunge enthalten sind. Mit jeder Knospe spüren wir alle fünf Geschmacksqualitäten: süß, salzig, sauer, bitter und umami/herzhaft. Die einzelne Sinneszelle erfasst aber stets nur eine Qualität.

Zucker etwa reagiert mit spezifischen Rezeptoren auf Sinneszellen für Süßes. Kommen nur wenige der Rezeptoren mit einem Zuckermolekül in Kontakt, entsteht ein schwach süßer Eindruck, bei vielen Kontakten ein starker. Die neuen Modulatoren für süß schmecken selbst nach nichts. Zucker, oder ein Süßstoff, wirkt damit zusammen aber viel intensiver als allein.



auch spezielle Substanzen entwickeln ließen, die zum Beispiel nur mit dem Süßrezeptor interagieren. So würde man gezielt auf die Süßwahrnehmung einwirken können. Mit dieser Idee gründeten der Biologe und einige Mitarbeiter im Jahr 1998 die Firma, aus der Senomyx hervorging. Zuker gehört heute zum wissenschaftlichen Beraterstab der Firma.

Neue potenzielle Geschmacksstoffe zu identifizieren war früher ein oft langwieriger Prozess. Testpersonen mussten die Substanzen einzeln probieren. Eine Firma konnte so im Jahr allenfalls einige tausend Stoffe prüfen.

Das geschieht nun, da die Rezeptorstrukturen aufgeklärt sind, um vieles effizienter. In Anlehnung an Verfahren der Pharmaindustrie entwarf Zuker Hochleistungs-Geschmackstestautomaten. Er arrangierte Tausende künstlicher Geschmackszellen so in winzigen Reaktionsgefäßen auf Mikrotiterplatten, dass jedes nur eine Sorte Geschmacksrezeptor enthält. Auf die Weise lässt sich gleichzeitig an Tausenden potenziellen Geschmacksmodulatoren prüfen, ob sie mit einem speziellen Rezeptor interagieren.

Die Firma verfügt heute über eine halbe Million synthetische und natürliche Substanzen. Laut Marc Zoller, Forschungsvorstand des Unternehmens, findet man mit dem System unter hunderten, auch tausenden neuen Substanzen und natürlichen Inhaltsstoffen die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen. Taucht ein Wirkstoff auf, der spezifisch nur auf eine Zellsorte anspricht, versuchen die Forscher ihn chemisch weiter zu optimieren, wiederum unter Verwendung von Mikrotiterplatten. Dabei geht es auch um Anforderungen an die späteren Produkte. Manche Geschmacksmodulatoren sollen sich in einer Flüssigkeit auflösen, manche auch bei Erhitzen wirken. Viele müssen sich in den Lebensmitteln monatelang halten. Auch für solche Eigenschaften entwickelt Senomyx Reihentestverfahren. Vizepräsidentin Gwen Rosenberg kommentiert: »Wir können eine Substanz, sagen wir, ins Müsli geben und dann im Testsystem beobachten, wie sie sich verhält und wie sie wohl schmeckt.«

Interessante Stoffe lässt das Unternehmen patentieren. Für ein Zertifikat auf Unbedenklichkeit reicht es Angaben beim amerikanischen Verband der Aromastoff- und Extrakthersteller in Washington D. C. ein. Im Jahr 1960 richtete die amerikanische Gesundheitsbehörde FDA für in geringen Mengen verzehrte Aroma- und Geschmackskomponenten das Programm GRAS ein. Die Abkürzung steht für *generally recognized as safe* (allgemein als sicher anerkannt). So müssen die Geschmacksmodulatoren, die den Lebensmitteln nur in geringen Spuren zugesetzt werden, nicht die weitaus strengeren Prüfvorschriften der FDA für Lebensmittelzusatzstoffe durchlaufen. Vielmehr entscheidet ein Gremium unabhängiger Wissenschaftler anhand der chemischen Eigenschaften, ob der Verzehr einer Substanz als ungefährlich einzustufen ist.

Selbst dieses Prüfverfahren kann sich zwei Jahre hinziehen. Dennoch bezweifeln manche die Zuverlässigkeit. Michael Jacobson, geschäftsführender Direktor des CSPI (Center for Science in the Public Interest) in Washington D. C., meint sogar, beim GRAS-Verfahren würde der Bock zum Gärtner gemacht. Doch gesteht er zu, typischerweise handele es sich bei Geschmacksstoffen um harmlose, in geringen Mengen verwendete Chemikalien. Gesundheitsbedenken seien deswegen noch nicht aufgetreten.

Bald ideale Süßstoffe?

Der wichtigste Forschungsschwerpunkt bei Senomyx sind bessere Süßungsmittel. Die gebräuchlichen niederkalorischen Zuckerersatzstoffe wie Aspartam, Saccharin und Sucralose haben in der benötigten Konzentration oft einen bitteren Nachgeschmack. Daher seien sie nicht ideal, meint denn auch Gary Beauchamp, Direktor des Monell Chemical Senses Center in Philadelphia, eines Forschungszentrums für

KALT UND KREMIG

Die kalifornische Firma Senomyx arbeitet auch an Substanzen, die sich – wie Menthol – auf der Zunge kühl anfühlen, oder die den Eindruck fettig oder kremig vermitteln. Vizepräsidentin Gwen Rosenberg bezeichnet diese Forschungen als völliges Neuland.

Wie unsere **Schulen** um **Klassen besser** werden können.

Jetzt neu am Kiosk!

Außerdem:

Gewaltforschung – Gehirntraining für Psychopathen.

Sagrada Familia – Das Geheimnis der Kathedrale in Barcelona.

Das philosophische Interview – Die Rationalität des Rausches.

Die erste Kugel im All – Schriftsteller Alex Capus porträtiert Physikgenie Fritz Zwicky.

Seien Sie anspruchsvoll.

Süddeutsche Zeitung

www.sz-wissen.de

Geschmackswahrnehmung. Softdrinks mit Süßstoffen schmecken wegen des Nachgeschmacks nie so gut wie das Original. Könnten die Hersteller weniger Süßstoff zusetzen, würde die Bitterwahrnehmung nicht angesprochen. (Besser als Cola Light schmeckt angeblich Coke Zero – wegen einer Süßstoffmischung, die eine insgesamt geringere Menge erlaubt, welche die Bitterrezeptoren nicht aktiviert.)

An dem Problem setzt Senomyx an. Die Idee ist, Moleküle zu finden, die allein nach gar nichts schmecken, die aber zusammen mit Süßstoffen – oder sehr wenig Zucker – den Sinneseindruck verstärken. »Wenn wir doch die Rezeptoren haben«, so Zuker, »müsste es eigentlich zu schaffen sein, dass ein bisschen Zucker nach viel schmeckt.«

Unter 200 000 Verbindungen fanden die Forscher schließlich eine, mit der Sucralose viermal so süß wirkt wie allein. Das Zulassungsverfahren ist abgeschlossen. Der Geschmacksmodulator könnte im nächsten Jahr Lebensmitteln zugesetzt werden. Das Marktpotenzial wäre riesig: Schätzungsweise 5000 Produkte enthalten gegenwärtig den Süßstoff Sucralose. Die Firma stieß außerdem auf eine Substanz, welche die Süße von normalem Tafelzucker verdoppelt, also von Rüben- oder Rohrzucker (Saccharose). Mit dergleichen Zusätzen könnte man Nahrungsmittel erzeugen, die deutlich weniger Kalorien enthalten und trotzdem genauso gut schmecken. Aber auch Diätprodukte würden damit noch besser munden.

Den ersten Modulator von Senomyx für herzhaften Geschmack hat Nestlé einigen Produkten schon zugesetzt. Sie wirken dadurch vollmundiger, kräftiger – wie normalerweise proteinreiche Nahrung mit Fleisch, Käse oder andererseits gut gewürzte Kartoffelchips. Gewöhnlich erzielt die Industrie diesen Eindruck bei Snacks mit viel Glutamat. Mit solch einem Modulator wäre es weit gehend verzichtbar.

Die kalifornische Firma entwickelt auch Bitterblocker. Solche Hemmstoffe könnten die Verwendung von Soja ausdehnen. Schokoprodukte müssten dann weniger Zucker enthalten, der den herben Nachgeschmack von Kakao ausgleichen soll. Manche Medikamente würden vermutlich leichter akzeptiert, wenn sie nicht so unangenehm schmeckten. Vielleicht eignen sich solche Zusätze sogar für Feldfrüchte, die – insbesondere für arme Länder – orale Impfstoffe liefern sollen, dadurch aber möglicherweise ungewohnt sind und von den Menschen abgelehnt werden. Gerade in dem Fall sollten die Hilfsstoffe natürlich wenig kosten.

Einen anderen Ansatz für Bitterblocker wie auch für Süßverstärker verfolgt die Firma Redpoint Bio in Ewing (New Jersey). Statt nach Stoffen, die an den Sinnesrezeptoren direkt wirken – also an den nach außen ragenden Strukturen der Sinneszellen, wo sich die Geschmacksstoffe anlagern –, sucht das Unternehmen nach Molekülen, die ihr Ziel tiefer in den Geschmacksknospen finden. Diese Substanzen sollen Signalwege in den Sinneszellen manipulieren, etwa über den membranständigen Ionenkanal TRPM5. Bestimmte, von der Firma entdeckte Hemmstoffe des Kanals mindern oder blockieren speziell den Bittereindruck, andere Substanzen verstärken die Zuckerintensität. Redpoint Bio arbeitet mit Coca-Cola und der Schweizer Firma Givaudan zusammen. Binnen zwei Jahren sollen Produkte mit den Modulatoren in den Handel kommen.

Den primären Rezeptor für salzigen Geschmack identifizierte Senomyx erst in diesem Jahr. Es handelt sich um einen Kanal in der Membran der Sinneszellen, durch den Natriumionen in die Zelle einströmen können. Weil eine hohe Salzaufnahme die Gefahr von Herz-Kreislauf-Erkrankungen steigert, wäre viel gewonnen, könnte man den Geschmackseindruck verstärken, also mehr Salz vortäuschen als vorhanden. Schon kleine Einschränkungen könnten sich auf Gesundheit und Lebensqualität deutlich auswirken, meint Zuker. Da sich unsere Ernährungsgewohnheiten so schwer ändern lassen, könne man vielleicht mehr erreichen, wenn man auf das Geschmacksempfinden abzielt. Womöglich konsumieren wir in einigen Jahren Produkte mit viel weniger Kalorien und viel weniger Salz als heute und bemerken den Unterschied nicht einmal.

Ob die Menschen dann tatsächlich weniger Kalorien zu sich nehmen werden, bleibt abzuwarten. Laut Beauchamp von Monell bewerten Forscher die Aussichten sehr verschieden. Es könne ja sein, dass wir gar nicht wegen des Geschmacks so gern viel Süßes in uns hineinstopfen. Das Monell-Forschungszentrum wird von Senomyx zum Teil finanziell unterstützt. Dort wird untersucht, inwiefern Menschen unterschiedliche Ernährungs- und Geschmacksvorlieben pflegen, wie sich der Geschmack des Essens auf Verdauung, Stoffwechsel und Appetit auswirkt und nicht zuletzt auch, wie der Körper das Essverhalten steuert.

Zum Beispiel scheinen unsere Geschmackspräferenzen vorläufigen Erkenntnissen zufolge schon im Alter von drei Monaten weit gehend festgelegt zu sein. Was die Mutter in der Schwangerschaft und Stillzeit isst, mag nachher auch das Kind. Wie solche Vorlieben mit dem Sättigungsgefühl zusammenhängen, wissen die Forscher allerdings noch nicht. Dazu meint Senomyx' Vizepräsidentin Gwen Rosenberg: »Sich satt fühlen, das ist eine komplexe Sache. Um das zu verstehen, wird noch so manche Studie laufen müssen.« ◁

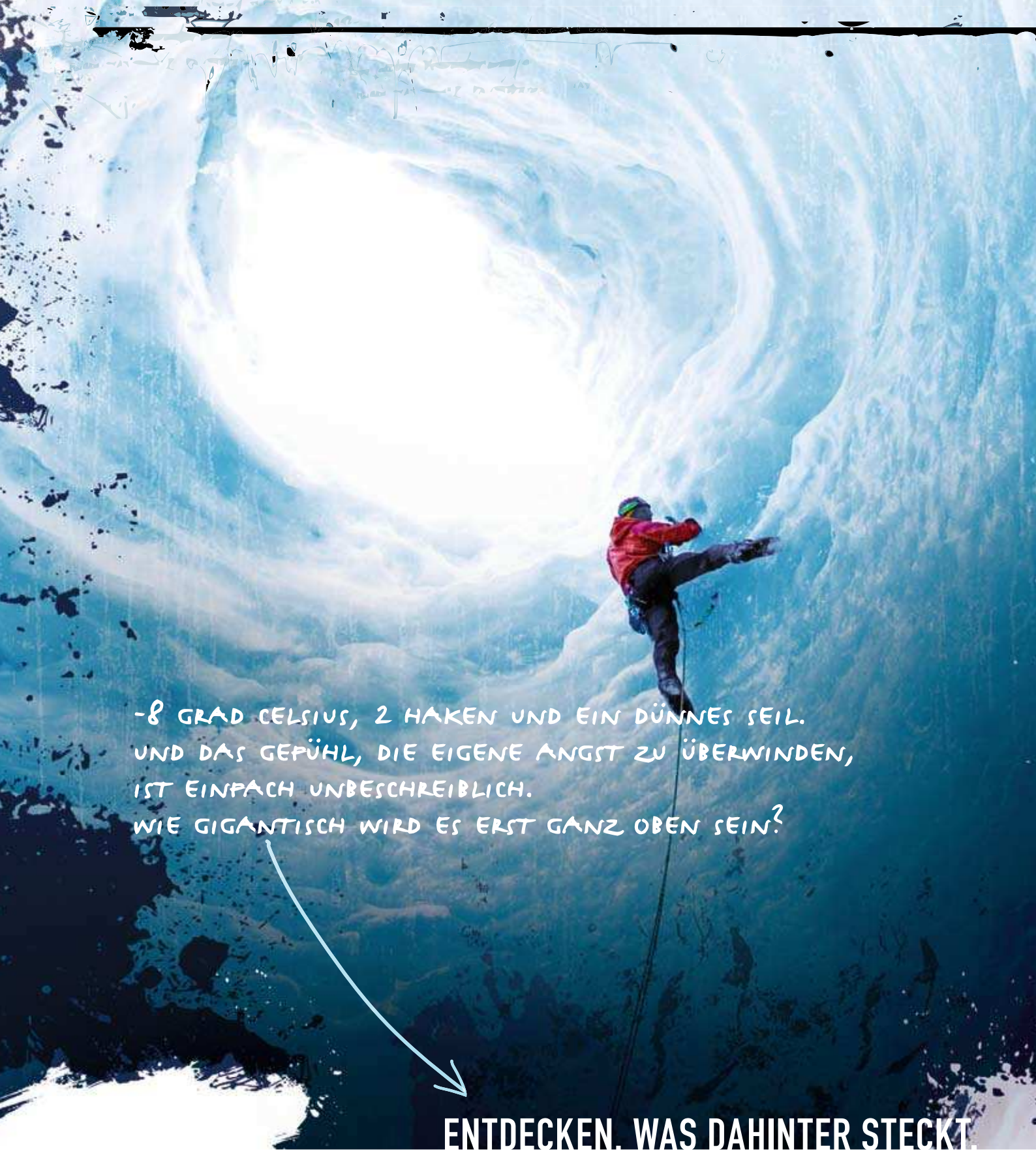
Ob die Menschen dank der neuen Geschmacksverstärker weniger Kalorien zu sich nehmen werden, bleibt abzuwarten

Melinda Wenner arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in New York.

Bradbury, J.: Taste Perception: Cracking the Code. In: PLoS Biology 2(3), S. 0295 – 0297, 16. März 2004.

Chandrashekar, J. et al.: The Receptors and Cells for Mammalian Taste. In: Nature 444, S. 288 – 294, 16. November 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965709.



WISSENSCHAFT
HERAUSFORDERUNG ZUKUNFT
GRÜNER PLANET
EXTREME JOBS
ABENTEUER
MEILENSTEINE

EXKLUSIV BEI PREMIERE

Discovery CHANNEL

MEHR INFORMATIONEN ZUM PROGRAMM UND ABONNEMENT FINDEN SIE UNTER http://info.discovery.de

RETTUNG FÜR DEN ARALSEE?

Einst war er der viertgrößte See der Welt. Doch rücksichtslose Bewässerung von Anbauflächen entlang seiner Zuflüsse hat ihn großenteils in unfruchtbares Ödland verwandelt. Nun erholt sich zumindest der nördliche Teil wieder.

Von Philip Micklin und Nikolay V. Aladin

In Kürze

▶ **Der Aralsee in Zentralasien** war noch 1960 der viertgrößte See der Erde. Bis 2007 ist er jedoch auf ein Zehntel seines ursprünglichen Volumens geschrumpft, weil sich durch die verschwenderische Bewässerung in seinem Einzugsgebiet der Eintrag von Frischwasser durch die beiden Flüsse Amudarja und Syrdarja drastisch reduziert hat.

▶ **Von der ehemaligen Wasserfläche** sind nur noch drei Restseen übrig – zwei davon so salzig, dass kein Fisch mehr darin leben kann. Die einst blühende Fischerei und die Wirtschaft der früheren Küstenstädte sind zusammengebrochen. Vom Boden der trockengefallenen Areale bläst der Wind nun Salze und Gifte über bewohnte Gebiete, was gesundheitliche Probleme für die Bevölkerung schafft.

▶ **Immerhin ließ ein 2005 gebauter Damm** den nördlichen See wieder wachsen und auch seinen Salzgehalt deutlich abnehmen. Fischpopulationen und Feuchtgebiete erholen sich – und mit ihnen die Wirtschaft. Die beiden südlichen Seen jedoch könnten zu toten Meeren werden, wenn keine Rettungsmaßnahmen ergriffen werden. Ein entsprechendes Projekt würde allerdings mehrere zehn Milliarden Dollar kosten und schwierige politische Übereinkünfte erfordern.

▶ **Anderen Seen droht ein ähnliches Schicksal** – vor allem dem Tschadsee in Zentralafrika und dem Saltonsee in Kalifornien. Beim Aralsee gesammelte Erfahrungen könnten ihnen helfen.

Niedergang

Der Aralsee wird hauptsächlich von den Flüssen Amudarja und Syrdarja gespeist. Über die Jahrtausende hinweg kam es immer wieder vor, dass einer von beiden seinen Lauf änderte und der See schrumpfte. Er erholte sich jedoch jedes Mal, sobald der Fluss wieder in ihn mündete. Heute werden für die intensive Bewässerung von Feldfrüchten wie Baumwolle oder Reis aus beiden Strömen gigantische Wassermengen entnommen, was den Zufluss in den Aralsee drastisch reduziert. Die Verdunstung übertrifft den Eintrag durch Regen, Schneeschmelze oder Grundwasser bei Weitem: Das Wasservolumen nimmt ab, und der Salzgehalt steigt.

Die Sowjetunion vertuschte den Niedergang des Sees jahrzehntelang, ehe Michail Gorbatschow 1985 die ökologische und menschliche Tragödie zugab. Ende der 1980er Jahre war der Wasserspiegel so stark gefallen, dass sich das Gewässer zweigeteilt hatte: in den Kleinen (nördlichen) und den Großen (südlichen) Aralsee. 2007 schließlich bestand der südliche Teil nur noch aus einem tiefen westlichen und einem flachen östlichen Becken sowie einem kleinen isolierten Golf. Das Wasservolumen war von 708 auf 75 Kubikkilometer zurückgegangen und der Salzgehalt von 14 auf über 100 Gramm pro Liter gestiegen. Beim Auseinanderbrechen der Sowjetunion 1991 fiel der Aralsee an die Nachfolgestaaten Kasachstan und Usbekistan, die seither um die größtmögliche Ausbeutung der schwindenden Ressource wetteifern. Das bedeutete auch das Aus für einen verzweifelten sowjetischen Rettungsplan, der vorsah, sibirische Flüssen nach Süden umzuleiten.

Der schrumpfende Aralsee hat sich hundert Kilometer von seinem einstigen Ufer nahe Mujnak in Usbekistan zurückgezogen.

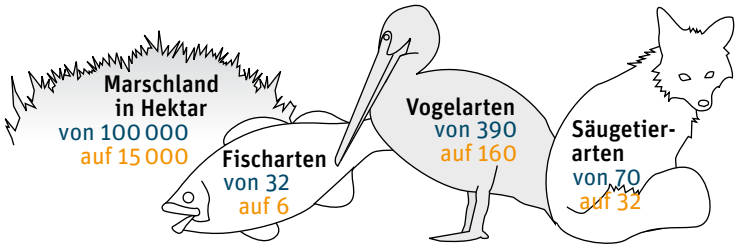
OBEN: CORBIS, MATTHIEU PALEY; SATELLITENBILDER UNTEN: WORLDSAT.ORG

Trotz eines riesigen Einzugsgebiets (oben) trocknet der Aralsee aus, weil Bewässerungskanäle wie der auf dem Foto (unten) seinen Zuflüssen Amudarja und Syrdarja Wasser entziehen und es über Hunderte von Kilometern durch mehrere Länder leiten. Eine der Folgen ist ein drastischer Rückgang der Tier- und Pflanzenbestände (ganz unten).

CORBIS, KAZUYOSHI NOMACHI

Ökologischer Niedergang

zwischen 1960 und 2000



ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: LUCY READING-IKKANDA

Tiefpunkt

Das Austrocknen des Aralsees hatte einschneidende Konsequenzen: Durch die stark verminderte Wasserführung der Flüsse blieben die Frühjahrsüberschwemmungen aus, welche die Feuchtgebiete mit Frischwasser und wertvollem Sediment versorgten. Von den ehemals 32 Fischarten überlebten wegen der Versalzung und dem Fehlen von Laich- und Nahrungsgründen nur sechs – großenteils in den Flussdeltas. Die Fischerei, deren Fang 1960 noch 40 000 Tonnen betrug, war Mitte der 1980er Jahre zusammengebrochen, was einen Verlust von mehr als 60 000 Arbeitsplätzen bedeutete. Am häufigsten kam damals der Schwarzmeer-Steinbutt (russisch Kambala) vor: ein in den 1970er Jahren eingeführter Salzwasserfisch. 2003 war er jedoch aus den südlichen Seen wieder verschwunden, weil der Salzgehalt mit mehr als 70 Gramm pro Liter mittlerweile doppelt so hoch lag wie in einem normalen Ozean.

Auch die Schifffahrt auf dem See wurde eingestellt; denn das Wasser hat sich von den wichtigsten Häfen – Aralsk (kasachisch Aral) im Norden und Mujnak im Süden – kilometerweit zurückgezogen. Immer längere Kanäle zu den Städten offen zu halten, wurde mit der Zeit zu kostspielig. Mit dem fallenden Pegel des Sees sank auch der Grundwasserspiegel, was zur Versteppung im Umland führte.

Wo früher einmal eine üppige Vegetation aus Bäumen, Büschen und Gras die Ufer bedeckte, kämpften Mitte der 1990er Jahre magere Bestände an Halo- und Xerophyten (salztoleranten beziehungsweise trockenresistenten Pflanzen) ums Überleben. Nur die Hälfte der einst hier vorkommenden Arten an Säugetieren und Vögeln ist noch anzutreffen.

Das Klima hat sich bis zu 100 Kilometer über die ursprüngliche Küstenlinie hinaus verändert: Heute sind die Sommer heißer und die Winter kälter; die Luftfeuchtigkeit hat sich verringert, so dass es weniger regnet. Bei einer generell verkürzten Wachstumsperiode treten häufiger Dürren auf.

CORBIS / SYGMA, PAUL HOWELL

Verrostete Güterwagons, die einst Industrie- und Fischereiprodukte aus der prosperierenden Hafenstadt Aralsk abtransportierten, symbolisieren den wirtschaftlichen Niedergang der Stadt.

Giftbelastung

Das zurückweichende Wasser hat 54 000 Quadratkilometer austrocknenden Seebodens freigelegt. Dieser ist versalzen und stellenweise mit Pestiziden und anderen Chemikalien aus landwirtschaftlichen Abwässern verseucht. Stürme tragen Salz, Staub und Schadstoffe bis zu 500 Kilometer weit. Meist kommen sie aus Norden oder Nordosten und belasten das südlich gelegene Delta des Amudarja. Das aber ist die am dichtesten besiedelte sowie wirtschaftlich und ökologisch wichtigste Gegend in der Region. Angewehtes Natriumhydrogenkarbonat (Natron), Natriumchlorid (Kochsalz) und Natriumsulfat (Glaubersalz) vernichten oder beeinträchtigen die natürliche Vegetation und die angebauten Feldfrüchte – eine grausame Ironie, wenn man bedenkt, dass die Bewässerung ebendieser Kulturpflanzen den See austrocknen ließ.

Nach Aussage von Gesundheitsexperten leidet die lokale Bevölkerung durch die salzhaltige Luft und das versalzene Wasser stark unter Atembeschwerden. Kehlkopf- und Speiseröhrenkrebs sowie Erkrankungen des Verdauungsapparates treten vermehrt auf. Leber- und Nierenleiden, aber auch Augenprobleme sind häufig. Der Ausfall von Fisch auf dem Speisezettel fördert Mangelernährung und Blutarmut, vor allem bei Schwangeren.

Eine besondere Gefahr geht von der Wosroschdenije-Insel (Insel der Wiedergeburt) aus. Solange sie weit draußen im See lag, testete die Sowjetunion dort Biowaffen: Die Erreger von Milzbrand, Tularämie (Hasenpest), Bruzellose, Pest, Typhus, Pocken und Botulismus wurden an Pferden, Affen, Schafen, Eseln und anderen Versuchstieren erprobt. Durch den Rückzug des Wassers verschmolz die Insel jedoch 2001 mit dem Festland im Süden. Nun befürchten Gesundheitsexperten, dass einzelne Erreger überlebt haben könnten. Womöglich werden sie durch Flöhe von infizierten Nagern auf Menschen übertragen, oder Terroristen bekommen Zugriff darauf.

CORBIS / AGP, ANTOINE GYORI

Einst im Hafen von Aralsk verklappte Pestizide und Abfälle liegen nun auf dem früheren Seeboden frei.

NASA, GSFC, MODIS, JACQUES DESCLOITRES

Heftige Stürme blasen die toxischen Substanzen mit mengenweise Sand und Salz über die Region. Dadurch wird die Vegetation vernichtet und die Gesundheit der ansässigen Bevölkerung beeinträchtigt.

Gesundheitsschäden bei der lokalen Bevölkerung

Zunahme von Erkrankungen

- Atemwegserkrankungen
- Kehlkopfkrebs
- Speiseröhrenkrebs
- Verdauungsbeschwerden
- Leberleiden
- Nierenleiden
- Blutarmut

Abnahme der Lebenserwartung

Die Lebenserwartung in der Region ist von 65 auf 61 Jahre gesunken.

PHILIP MICKLIN

Dieses sowjetische Patrouillenboot, das einst die Biowaffenarsenale auf der Wosroschdenije-Insel bewachte, ist nun auf dem ausgetrockneten Seeboden gestrandet.

Hoffnung für den Norden

Es wird kaum möglich sein, den gesamten Aralsee in den Zustand von 1960 zurückzuversetzen. Dazu müssten die jährlichen Zuflüsse von im Moment durchschnittlich 13 Kubikkilometern aus Amudarja und Syrdarja vervierfacht werden. Das ginge nicht ohne drastische Einschnitte bei der landwirtschaftlichen Bewässerung, die für 92 Prozent der Entnahmen aus den Flüssen verantwortlich ist. Doch vier der fünf ehemaligen Sowjetrepubliken im Aralseebecken (die Ausnahme ist Kasachstan) beabsichtigen im Gegenteil, die Bewässerung zu steigern – hauptsächlich um ihre wachsende Bevölkerung ernähren zu können. Entlastung brächte der Wechsel zu genügsameren Feldfrüchten wie Winterweizen, aber die beiden größten Wasserverbraucher (Usbekistan und Turkmenistan) wollen weiterhin Baumwolle anbauen, deren Export wertvolle Devisen bringt. Auch könnten die ausgedehnten Bewässerungskanäle deutlich verbessert werden. Manche sind nur Schneisen durch den Sand, in dem enorme Wassermengen einfach versickern. Durch die Modernisierung des gesamten Systems ließen sich jährlich schätzungsweise 12 Kubikkilometer Wasser sparen. Das würde allerdings mindestens 16 Milliarden Dollar kosten, und die betroffenen Staaten haben weder das Geld noch den politischen Willen dazu.

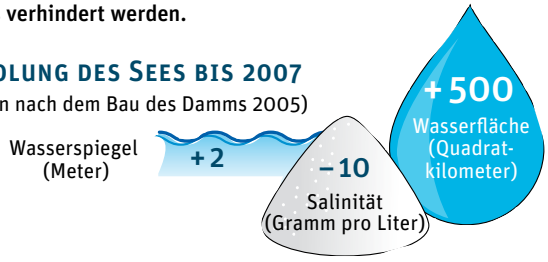
Immerhin hat Kasachstan versucht, den nördlichen Aralsee wenigstens zum Teil in den alten Zustand zurückzuversetzen. So sollte ein Erddeich, der in den frühen 1990er Jahren gebaut wurde, den Abfluss des Wassers in den Süden verhindern, wo es nutzlos verdunstete. Leider brach der Damm mehrmals, und ein katastrophaler Einsturz im April 1999 zerstörte ihn völlig. Der Versuch demonstrierte aber die prinzipielle Möglichkeit, den Wasserspiegel anzuheben und den Salzgehalt zu senken. Das ermutigte Kasachstan und die Weltbank zu einem 85-Millionen-Dollar-Projekt, bei dem ein wesentlich stärkerer, 13 Kilometer langer Deich mit einer Betonschleuse für den kontrollierten Wasserablauf gebaut wurde. Nach seiner Fertigstellung im November 2005 leistete ein starker Zufluss durch den Syrdarja im anschließenden Winter Starthilfe bei der Rettung des nördlichen Sees. Der Wasserstand stieg in nur acht Monaten von 40 auf die geplante Höhe von 42 Metern, wobei die Wasserfläche um 18 Prozent zunahm. Die Salinität ist seither stetig von 20 auf heute 10 Gramm pro Liter gesunken. Die Fischer können wieder mehrere Fischarten in nennenswerten Mengen fangen – vor allem den teuren Zander (in Russland als Sudak bekannt) und den Sazan (türkisch für Karpfen).

UNTEN: IGOR PLOTNIKOV; OBEN: PHILIP MICKLIN

Ein 13 Kilometer langer Damm mit Schleuse (oben), den Kasachstan 2005 errichtete, hat den Kleinen Aralsee gerettet. Er unterbindet den Abfluss in nicht mehr benutzte Kanäle, die ins Nirgendwo führen. Nach seiner Fertigstellung im November 2005 stieg der Wasserpegel und lag bereits im folgenden Sommer um zwei Meter höher. Gleichzeitig ist der Salzgehalt gesunken. Durch die Schleuse (unten) kann der Seespiegel reguliert und eine Überflutung des Damms verhindert werden.

Die Erholung des Sees bis 2007

(Änderungen nach dem Bau des Damms 2005)



Die Fischbestände im Kleinen Aralsee haben sich in den letzten Jahren schnell erholt. Das verhilft den Fischern aus den umgebenden Dörfern zu einem neuerlichen Einkommen (unten und rechts oben). Auch ein Verarbeitungsbetrieb in Aralsk hat seinen Betrieb wieder aufgenommen (rechts unten). All das kurbelt die lokale Wirtschaft an.

FOTOS DIESER SEITE: SYLVAIN LECHTI

Steigender Wohlstand

Wir erwarten, dass sich der Salzgehalt im Kleinen Aralsee je nach Abschnitt zwischen drei und 14 Gramm pro Liter einpendelt. Bei diesen Werten sollten noch viel mehr einheimische Fischarten zurückkehren; der in Salzwasser lebende Schwarzmeer-Steinbutt würde allerdings an den meisten Stellen verschwinden. Eine noch weitergehende Renaturierung scheint möglich: Steigen beispielsweise die jährlichen Zuflüsse durch den Syrdarja durch Einsparungen bei der Bewässerung auf 4,5 Kubikkilometer, was durchaus realistisch ist, könnte sich der Wasserstand bei 47 Metern stabilisieren. Das brächte die Küste auf acht Kilometer an Aralsk heran – nahe genug, um den Kanal wieder auszubaggern, der die Stadt früher mit dem sich zurückziehenden Wasser verband.

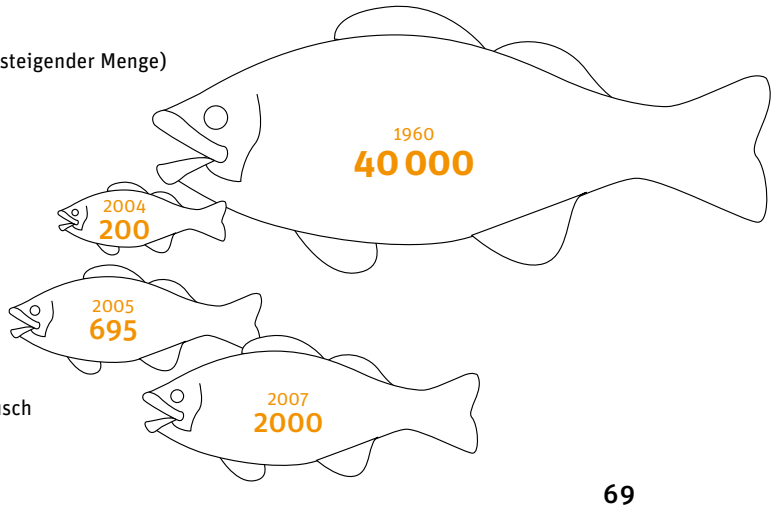
Die großen kommerziellen Fischereifahrzeuge erhielten so erneut Zugang zum See, und auch die Schifffahrt könnte wieder aufgenommen werden. Durch die weiter sinkende Salinität würden sich Marschland und Fischpopulationen noch stärker erholen. Mehr Wasser könnte zu den südlichen Seen ablaufen und helfen, auch sie teilweise zu retten (siehe Karte auf S. 70). Dieser Plan erfordert aber einen viel höheren und längeren Deich sowie einen Umbau der Schleusen. Es ist nicht klar, ob Kasachstan die Mittel und die Absicht hat, ihn zu verfolgen. In der Diskussion sind derzeit etwas weniger aufwändige Möglichkeiten, das Wasser näher an Aralsk heranzubringen.

Fangrückgang und -erholung

(Tonnen)

Gefangene Arten
(Herbst 2007, in absteigender Menge)

1. Karpfen
2. Brasse
3. Plötze
4. Zander
5. Flunder
6. Rapfen
7. Zobel
8. Karausche
9. Sabre
10. Hecht
11. Barsch
12. Rotfeder
13. Mairenke
14. Wels
15. Schlangenkopffisch
16. Goldorfe



Ungewissheit im Süden

Die Aussichten für den Großen Aralsee sind eher düster: Er schrumpft weiterhin rapide. Nur noch ein langer, enger Kanal verbindet das flache östliche Becken mit dem tieferen westlichen, und auch der könnte sich völlig schließen. Wenn die Länder entlang dem Amudarja nicht gegensteuern, wird sich beim Grundwasserstand und bei den Verdunstungsraten von heute ein isoliertes östliches Becken bilden, das schätzungsweise 4300 Quadratkilometer misst und im Durchschnitt nur zweieinhalb Meter tief ist. Sein Salzgehalt dürfte 100 Gramm pro Liter übersteigen und vielleicht sogar das Doppelte erreichen. Nur Salinenkrebschen oder Bakterien könnten in dieser Sole noch existieren.

Das Schicksal des westlichen Beckens hängt vom Eintrag durch Grundwasser ab. Schätzungen darüber sind jedoch unsicher. Einer von uns (Aladin) hat zahlreiche Süßwasserquellen im Bereich der westlichen Klippen entdeckt. Unseren Berechnungen zufolge sollte sich die Wasserfläche bei ungefähr 2100 Quadratkilometern stabilisieren. Der See wird mit stellenweise 37 Metern dann noch relativ tief sein, aber wie der östliche Teil einen extrem hohen Salzgehalt von mehr als 100 Gramm pro Liter aufweisen.

Durch umfangreiche Baumaßnahmen ließe sich das westliche Becken wenigstens teilweise sanieren. Ein früherer Plan, den einer von uns (Micklin) aktualisiert hat, könnte dabei helfen (Grafik rechts). Er ist aber nicht genau durchgerechnet worden, und so sind die damit verbundenen Kosten unklar. Fest steht nur: Das Unternehmen würde sehr teuer. Andererseits wäre dafür nur ein etwas gesteigerter Zufluss durch den Amudarja erforderlich, wie er sich mit relativ bescheidenen Einschränkungen bei der Bewässerung im Einzugsgebiet erreichen ließe.

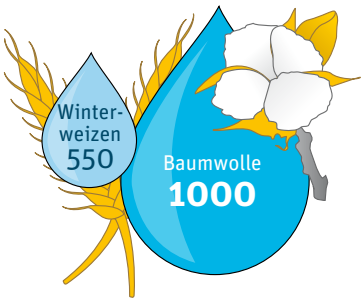
Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Wiederherstellung der Feuchtgebiete. Die Sowjetunion begann damit in den späten 1980er Jahren, und Usbekistan hat die entsprechenden Projekte mit internationaler Hilfe fortgesetzt. Das brachte leichte Verbesserungen bei Artenvielfalt, Fischerei und natürlicher Filterung von Abwasser durch die Seevegetation. Doch an der grundlegenden Misere hat sich nichts geändert. Der Aralsee ist über 40 Jahre hinweg ausgetrocknet. Langfristige, nachhaltige Lösungen erfordern nicht nur größere Investitionen und technische Innovationen, sondern auch fundamentale politische, soziale und ökonomische Veränderungen.

CORBIS, DAVID TURNLEY

Baumwolle verlangt intensive Bewässerung. Durch den Wechsel zu genügsameren Feldfrüchten wie Winterweizen ließe sich Wasser sparen, das dringend für die Wiederbelebung des Aralsees gebraucht würde. Da der Export von Baumwolle Devisen bringt, dürfte sie jedoch Hauptanbauprodukt bleiben.

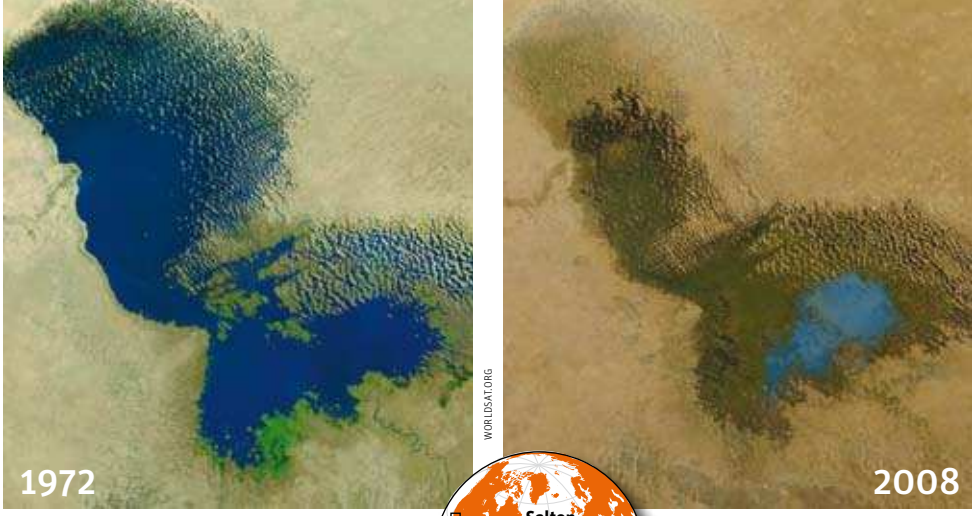
Rettungsplan

Mit einem ehrgeizigen Projekt ließe sich der südwestliche Teil des Aralsees wiederherstellen und der nördliche vergrößern. Es erfordert die hier gezeigten Baumaßnahmen sowie eine mäßige, durchaus machbare Verringerung der Wasserverluste durch die Bewässerungssysteme des Amudarja. Seine Umsetzung würde das lokale Klima verbessern und wertvolle Lebensräume für Vögel und Wassertiere schaffen. Durch einen gelegentlichen Abfluss ins östliche Becken ließe sich das westliche auffrischen, da stark salzhaltige Lauge weggeführt würde, während vom Amudarja Süßwasser nachströmt. So könnte der Salzgehalt unter 15 Gramm pro Liter sinken und der See wieder günstige Bedingungen für Fische bieten. Das östliche Becken würde allerdings völlig versalzen und nur noch Salinenkrebse und Bakterien beherbergen. Durch die Vergrößerung des Kleinen Aralsees könnte Aralsk wieder Ausgangshafen für die kommerzielle Schifffahrt und Fischereiflotten werden.



Unterschiede im Wasserbedarf

(Regen und künstliche Bewässerung in Millimetern pro Saison)



WORLDSAT.ORG

Der Tschadsee in Zentralafrika ist durch die ausgedehnte Bewässerung von Feldfrüchten und Weideland auf ein Zehntel der Größe von 1960 geschrumpft. Bewohner der vier Anrainerstaaten – vor allem Bauern und Hirten – liefern sich häufig heftige Kämpfe um das verbliebene, nur noch eineinhalb Meter tiefe Wasser (blau).

THE DESERT SUN, JAY CALDERON

Unzählige tote Barsche verrotten am Ufer des Saltonsees in Kalifornien, der wegen verfehlter Bewässerungsmaßnahmen im Umkreis immer stärker versalzt. Verschiedene Pläne werden erwogen, die Sole zu verdünnen, bevor alle Fische verendet sind.

Lehren für die Welt

Bis vor Kurzem noch gaben viele Beobachter den Aralsee verloren. Wie die Fortschritte im Norden demonstrieren, lassen sich beträchtliche Teile des verbliebenen Rests jedoch ökologisch und ökonomisch retten. Einerseits zeigt sich also, welch verheerenden Schaden moderne Gesellschaften mit hochtechnisierter Landwirtschaft der Natur und der eigenen Bevölkerung zufügen können. Andererseits wird das enorme Potenzial für eine Erholung der fast zerstörten Umwelt deutlich. Auch andere stehende Gewässer auf der Erde sind von Austrocknung und Versalzung bedroht. Das betrifft vor allem den Tschadsee in Zentralafrika und den Saltonsee im südlichen Kalifornien. Hier gilt es, die Fehler in den ehemaligen Sowjetrepubliken nicht zu wiederholen. Die wichtigsten Lehren lauten:

1 Die natürliche Umwelt ist schnell zerstört, die Reparatur des Schadens aber langwierig und mühsam. Deshalb sollten die langfristigen Konsequenzen größerer Eingriffe in die Natur im Vorfeld sorgfältig geprüft werden – was die Sowjetunion leider versäumt hat.

2 Das Prinzip der Nachhaltigkeit ist zu beachten. Über viele Jahrhunderte hinweg setzten Landwirte im Aralseebecken die künstliche Bewässerung ein, ohne den See zu gefährden. Erst die übermäßige Wassernutzung ab 1960 brachte das hydrologische Gleichgewicht zum Kippen.

3 Schnelle Abhilfe ist bei komplexen ökologischen und humanitären Problemen nicht das Mittel der Wahl. Einschneidende Beschränkungen beim Baumwollanbau brächten zwar mehr Wasser in den Aralsee, würden jedoch der Wirtschaft schaden; die Arbeitslosigkeit stiege, und es käme zu sozialen Unruhen. Nachhaltige Lösungen erfordern nicht nur Geld und Innovationen, sie müssen auch politisch, sozial und ökonomisch durchführbar sein.

4 Natur und Umwelt sind erstaunlich belastbar. Für Rettungsversuche ist es nie zu spät. Man darf nur die Hoffnung nicht aufgeben. Viele Experten hatten den Aralsee schon abgeschrieben; doch nun sind entscheidende Teile von ihm auf dem Weg der Besserung. ◁

Philip Micklin (links) und **Nikolay V. Aladin** haben die Verhältnisse am Aralsee in den letzten zehn Jahren mehrmals vor Ort untersucht. Micklin ist emeritierter Geografieprofessor an der Western Michigan University in Kalamazoo. Aladin leitet das Brackwasserlabor am Zoologischen Institut der russischen Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg.

Aladin, N. V. et al.: Hydrobiology of the Aral Sea. In: Aladin, N. V. (Hg.): Dying and Dead Seas: Climatic vs. Anthropic Causes. NATO Science Series IV. Earth and Environmental Sciences 36. Kluwer, 2004.

Micklin, P.: The Aral Sea Disaster. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 35, S. 47 – 72, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965710.

Wie halten sich Spinnen an Glas?

»An den Füßen der meisten mit Bananen regelmäßig eingeschleppten Spinnen findet sich als Besonderheit ein dichtes Büschel Haare, die sogenannte Scopula. … Es war nun zu untersuchen, auf welche Weise die ungeheure Zahl von Haftpunkten der Scopula an glatten Flächen zu halten vermag. Zur Diskussion standen neben elektrischen Kräften und Klebstoffen … Kapillarwirkungen an der überall vorhandenen Wasserhaut. Deren Dicke beträgt bis etwa 300 Molekeln. Durch Behandlung der Glasoberfläche mit Silanen und Silikonöl wurde der feine Wasserfilm entfernt. Es war den Spinnen nicht mehr möglich, sich zu halten.« *Umschau, 58. Jg., Nr. 20, Oktober 1958, S. 634*

Strahlenchemie macht Fingerabdrücke sichtbar

»Die Ausstrahlung radioaktiver Isotope läßt sich bekanntlich mit sehr empfindlichen Meßgeräten bereits dann feststellen, wenn die Radioisotope in einem mit den üblichen chemisch-analytischen Verfahren nicht mehr erfaßbaren Betrag vorhanden sind. Die Forscher verwendeten Formaldehyd, … in welchem das Kohlenstoffatom durch sein radioaktives Isotop C-14 ersetzt worden war. Formaldehyd reagiert mit den meisten Ausscheidungsprodukten der Haut. … Infolgedessen wird bei den Reaktionen der strahlende Kohlenstoff in die Ausscheidungsprodukte eingebaut. Das bedeutet, dass die hinterlassenen Fingerabdrücke radioaktiv werden und sich … stärker als nach jeder anderen Behandlung verraten.« *Orion, 13. Jg., Nr. 10, Oktober 1958, S. X/22*

Lottoglück aus Automaten

»In Deutschland werden versuchsweise Lottoschein-Automaten aufgestellt. Nach Einwurf eines 50-Pfennigstückes können die gewünschten Zahlen auf den sichtbaren Tasten gedrückt werden wie bei einer Rechenmaschine. Der Losschein fällt und kann durch eine Klappe entnommen werden. Im Apparat spult sich eine Duplikat-Los-Scheinrolle auf. Die Lotto-Scheine tragen Stanznummern, aus denen die Losscheinnummern, Annahmestellen-Kennummer und Spielwoche erkennbar sind.« *Neuheiten und Erfindungen, Nr. 283, Oktober 1958, S. 183*

Pilotversuch: Lottoschein rund um die Uhr

Neuer Rettungsgürtel

»Vor den Hamburger Hafenbehörden hat kürzlich J. S. Nowotnick einen neuen von ihm erfundenen Rettungsgürtel demonstriert. … Der Gürtel besteht aus Gummi, er wird um den Körper unter den Armen angelegt und seine beiden Enden zusammengeschlossen, sodann durch eine kleine Drehung das Ventil eines Gasbehälters für flüssige Kohlensäure geöffnet, wobei diese in Gasform übergeht und den Gürtel in 2–3 Sekunden voll aufbläht. … Mit Kork oder Renntierhaar gefüllte Gürtel haben erheblich mehr Gewicht und geringere Tragfähigkeit.« *Umschau, 12. Jg., Nr. 44, Oktober 1908, S. 877*

Selbstaufblasender Rettungsring aus Gummi

Richtungshören

»Über die Ursache der Schallrichtungs-Wahrnehmung wurden interessante Versuche angestellt, bei denen der Ton einer Stimmgabel den beiden Ohren durch Schläuche zugeführt wurde und eine einfache Vorrichtung es gestattete, den Schallwellen eine beliebige Phasendifferenz zu geben. Durch diese Versuche wurde die Rayleigh'sche Ansicht bestätigt, daß die Phasenverschiedenheit der die beiden Ohren gleichzeitig erreichenden, von derselben Tonquelle herrührenden Wellen wesentlich zur Beurteilung der Richtung, in der sich die Tonquelle befindet, beiträgt.« *Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd. 23., Nr. 42, 18. Oktober 1908, S. 660*

Signale, die von Herzen kommen

»Prof. Dr. W. Einthoven hat Versuche angestellt, denen zufolge das menschliche Herz bei jeder Zusammenziehung einen elektrischen Stromstoß erzeugt, der sich nach allen Teilen des Organismus, z. B. nach den Händen und Füßen fortpflanzt. Verbindet man mit diesen ein empfindliches Meßgerät, so kann man bei jedem Schlag des Herzens einen Ausschlag beobachten. Die Aufzeichnung dieser Ausschläge ergibt eine Kurve, … die nach dem Zustande des Herzens gewisse Eigenarten aufweist.« *Umschau, 12. Jg., Nr. 43, Oktober 1908, S. 862*

Wie man EINEN BRIEF frankiert

Im zweiten Teil der Serie geht es um Komplexität, hier um die Frage, wie effizient sich bestimmte kombinatorische Probleme lösen lassen. In der Komplexitätstheorie ist dies unter dem Kürzel »P = NP« bekannt (siehe »Info«). Für die Lösung bietet das Clay Institute ein Preisgeld von einer Million Dollar.

Von Ian Stewart

Eines Tages muss sich ein früher babylonischer Schreiber entschlossen haben, seinen Schülern Arithmetik beizubringen. Er stellte ihnen Probleme der Art »Ich fand einen Stein, habe ihn aber nicht gewogen ...«. Seitdem interessieren sich Mathematiker stets auch für die verborgenen Tiefen scheinbarer Alltagsprobleme: wie man Torten in Teile schneidet, Knoten knüpft oder Münzen rotieren lässt. Aber selbst die Fachleute waren davon überrascht, welch abgründiges Geheimnis hinter einer unschuldigen Frage zu Briefmarken steckt.

Angenommen, Ihr Postamt verkauft Ihnen Briefmarken nur in zwei Stückelungen: zwei Cent und fünf Cent. Kombiniert man diese Werte, dann lässt sich daraus fast jeder gewünschte Wert zusammensetzen. Wenn beispielsweise ein Brief neun Cent kostet, dann kann man eine Briefmarke mit fünf Cent und dazu zwei mit je zwei Cent daraufkleben. Nicht darstellen lassen sich ein Cent und drei Cent – und das sind die einzigen nicht darstellbaren Beträge. Jeden geraden Betrag erreicht man jedenfalls mit ausreichend vielen Zwei-Cent-Marken – zumindest, falls der Umschlag groß genug ist –, und jeder ungerade Betrag über fünf Cent ergibt sich mit Hilfe einer Fünf-Cent- und entsprechend vielen Zwei-Cent-Marken.

Dieses Beispiel ist typisch für das Stückelungsproblem. Eine unbegrenzte Zahl an Briefmarken (nicht an Markenwerten!) vorausgesetzt, existiert immer ein Schwellenwert, von dem ab sich jeder beliebige Betrag darstellen lässt, indem eine passende Kombination von Marken auf den Umschlag geklebt wird. Das gilt auch, wenn mehr als nur zwei Markenwerte zur Verfügung stehen.

Die Eine-Million-Dollar-Frage lautet aber: Gegeben seien Briefmarken mit n verschiedenen Stückelungen, wie groß ist dann dieser Schwellenwert? Der Erste, der sich mit einer allerdings einfacheren Variante dieses Problems befasst hat, war im Jahr 1883 James Joseph Sylvester (1814–1897). Genauer gesagt hat er sich mit Münzen beschäftigt, aber wir bleiben hier trotzdem bei Briefmarken. Dem englischen Mathematiker gelang es, eine einfache Formel zur Bestimmung dieses Schlüsselwerts für den Fall zweier Stückwerte anzugeben (siehe Kasten S. 77).

Effizient, einfach, polynomial

In seiner allgemeinen Form könnte die Lösung unseres Briefmarkenrätsels tatsächlich eine Million Dollar einbringen: Das Clay Mathematics Institute in Cambridge, Massachusetts, offeriert nämlich genau diese Summe demjenigen, dem es gelingt, ein Problem zu lösen, das logisch äquivalent zu unserer Frankierfrage ist. Gerade jetzt gibt es neue, aufregende Hinweise darauf, dass es – und damit vielleicht auch das damit verwandte Eine-Million-Dollar-Rätsel – möglicherweise doch nicht so einschüchternd ist, wie es scheint.

In Kürze

Womit beschäftigt sich die Komplexitätstheorie?

Es gibt Probleme, deren Lösung extrem schwierig ist, sich aber leicht überprüfen lässt. Hier Beispiele:

Das Sortierproblem: Sortiere eine gegebene Liste von Zahlen nach ihrer Größe.

Das Rucksackproblem: Aus einer Menge von Gegenständen mit verschiedenen Volumina und Werten wähle eine Teilmenge so aus, dass sie »in den Rucksack passt«, das heißt ein vorgegebenes Gesamtvolumen nicht überschreitet, und zugleich ihr Gesamtwert maximal wird.

Das Faktorisierungsproblem: Ist eine vorgegebene Zahl eine Produkt zweier Faktoren?

SERIE: DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

Teil I:	Interview mit Gerd Faltings	SdW 09/2008
	Die riemannsche Vermutung	
Teil II:	Das Komplexitätsproblem P = NP	SdW 10/2008
	Ein Beispiel: Rekonstruktion von Gen-Inversionen (S. 80)	
Teil III:	Die goldbachsche Vermutung / Primzahlzwillinge	SdW 12/2008
Teil IV:	Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer	SdW 01/2009
Teil V:	Das abc-Problem	SdW 02/2009
Teil VI:	Das Yang-Mills-Problem	SdW 03/2009
Teil VII:	Das Navier-Stokes-Problem	SdW 04/2009

CALLY, WWW.ANTAR.CC

Von dem Mathematiker James Joseph Sylvester (1814 – 1897) stammt die erste, einfache Formulierung des Sortierproblems.

Darüber nachzudenken, wie wir unsere Briefe frankieren, könnte also zum Durchbruch bei einem der bedeutendsten mathematischen Rätsel des 21. Jahrhunderts führen.

Dieses Problem dreht sich um den Aufwand, der zur Lösung einer Aufgabe nötig ist – ausgedrückt nicht in Euro oder Cent, sondern in Rechenzeit. Als Maß für die Kompliziertheit einer Berechnung betrachtet man nämlich die Anzahl der einzelnen dazu nötigen Operationen: Um den Umfang eines bestimmten Problems abzuschätzen, fragt man, wie lange ein entsprechendes Lösungsverfahren »laufen« würde. Diese Laufzeit wird dann wiederum als Funktion der Problemgröße ausgedrückt. Das ist zum Beispiel die Anzahl der Ziffern, die zu berechnen sind. So vergleicht man etwa, wie viel länger die Berechnung einer Zahl mit 50 Stellen dauert, verglichen mit der für eine 25-stellige. Und wie steht es mit 100-stelligen Zahlen oder gar beliebig großen Zahlenmostern? Ich will dabei aber deutlich sagen, dass »Rechenzeit« hier im abstrakten Sinn zu verstehen ist. Sie hat zwar etwas mit der Zeit zu tun, die ein echter Computer für die gesamte Operation brauchen würde, ist aber nicht genau dasselbe.

Etwas unscharf ausgedrückt betrachtet man ein Rechenverfahren als »effizient« oder auch »einfach«, falls die benötigte Rechenzeit mit ei-

INFO

Wie komplex ist komplex?

Ein Maß für Komplexität ist die Zahl der maximal notwendigen Rechenschritte eines Computers für eine gegebene Eingabelänge n.

Für Probleme der Komplexitätsklasse »P« (polynomial) wächst die Rechenzeit proportional zu einer Potenz k von n, also n^k. Solche Probleme gelten als »praktisch lösbar«.

Andere Probleme gehören zur so genannten Klasse »NP« (nichtdeterministisch polynomial). Unklar ist, ob **die Klassen P und NP identisch** sind: ob also die schwersten NP-Probleme ebenso effizient gelöst werden können wie P-Probleme. Kurz: Ist P = NP?

ner bestimmten Potenz der Ziffernzahl wächst, die ein bestimmtes Problem charakterisiert. Ein Algorithmus, der etwa eine Zahl q daraufhin prüft, ob sie eine Primzahl ist, könnte eine Rechenzeit haben, die mit der sechsten Potenz der Stellenanzahl von q anwächst.

Im Jargon der Mathematiker zählen Algorithmen, deren Laufzeit sich so verhält, »zur Klasse P«. Dabei steht das »P« für »polynomial«. Algorithmen, die polynomiale Rechenzeit haben (im Primzahlbeispiel also proportional zu n^6), weisen eine besondere Eigenschaft auf: Sie erweisen sich als vergleichsweise stabil. Wird etwa die Größe des Eingabewertes geringfügig vergrößert, verlängert sich die Rechenzeit nicht allzu sehr. Im Gegensatz dazu sind so genannte »Nicht-P«-Algorithmen im Allgemeinen ineffizient. Selbst wenn die Eingabedaten nur etwas umfangreicher werden, droht die Rechenzeit ins Astronomische anzuwachsen.

Etwas genauer betrachtet ist die Angelegenheit leider doch nicht ganz so einfach. Einerseits können manche Nicht-P-Algorithmen nämlich ziemlich effizient sein, zumindest solange die Eingabe nicht allzu umfangreich wird; andererseits können die Parameter mancher P-Algorithmen so groß werden, dass die Laufzeit ein Menschenleben überträfe. Trotzdem scheint die Unterscheidung zwischen P- und Nicht-P-Algorithmen die grundlegendste und wichtigste für alle Fragen zu sein, die mit der Effizienz von Algorithmen zu tun haben. Sie bietet Mathematikern eine Möglichkeit, den intuitiven Unterschied zwischen »leicht zu berechnen« und »schwierig zu berechnen« formal zu erfassen.

Gibt es denn so etwas wie wirklich schwierige Probleme? Die Antwort lautet »Ja, sogar ganz verschiedene Sorten«. Die offensichtlichen dieser Fälle sind aus einem ganz schlichten Grund schwierig, etwa, weil die Ausgabe des Ergebnisses viel zu lange dauert. Ein Beispiel: »Drucke alle möglichen Kombinationen der nachfolgenden Liste von Symbolen!« Für die 52 Karten in einem Kartenspiel wären das nämlich schon 80 658 175 170 943 878 571 660 636 856 403 766 975 289 505 440 883 277 824 000 000 000 000, also rund $8 \cdot 10^{67}$ verschiedene Anordnungen, und sie alle wären – dem »Algorithmus« zufolge – auszudrucken.

Ist eine leicht überprüfbare Lösung auch leicht zu finden?

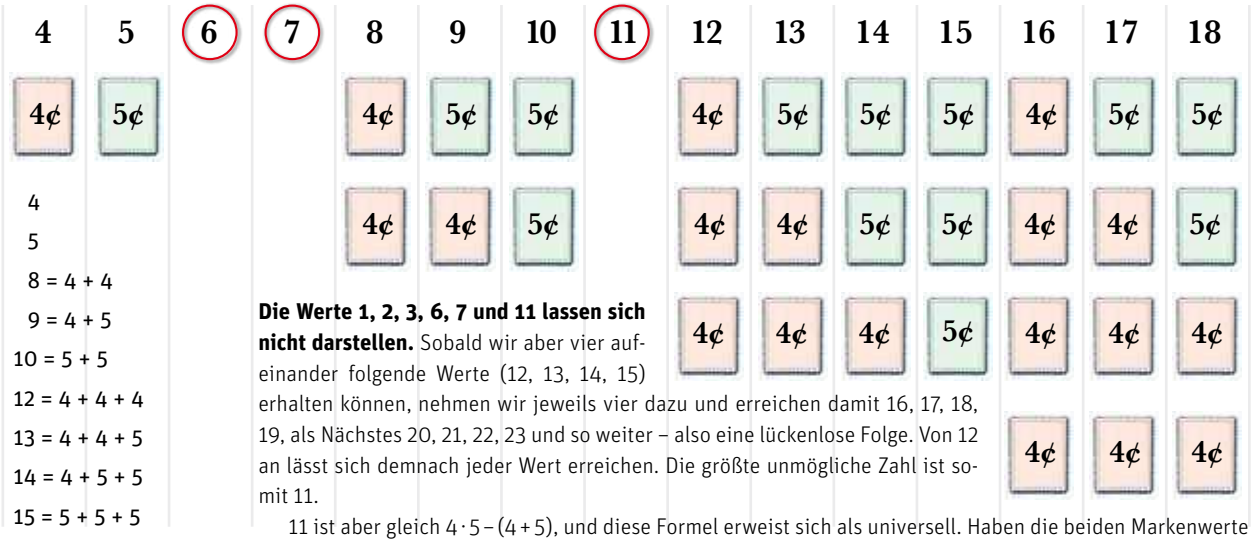
Probleme dieser simplen Art sollten ausgeschlossen werden. Wir erreichen das durch die Einführung einer neuen Klasse von Algorithmen, die im Fachjargon verwirrenderweise mit NP bezeichnet wird. Diese Abkürzung steht für eine »nichtdeterministisch polynomiale« Rechenzeit. Was heißt das? Die Definition lautet: Ein Problem gehört dann zur Klasse NP, wenn für jede vorgeschlagene Lösung in polynomialer – also akzeptabler – Zeit entschieden werden kann, ob sie richtig oder falsch ist. Eine grobe, aber dennoch hilfreiche Analogie liefern Puzzles. Es kann zwar sehr lange dauern, bis man alle Teile in einem Bild zusammengefügt hat – das wäre der nichtdeterministische Aspekt. Doch es genügt meist schon ein kurzer Blick, um festzustellen, ob das Ergebnis auch stimmt.

Diese Einteilung in die zwei Problemklassen P und NP hat zu einer fundamentalen Frage geführt, und wer sie beantwortet, der hat Anspruch auf den Clay-Preis: Ist NP gleich P, oder ist NP wirklich verschieden von P? Stark vereinfacht könnte man fragen, ob sich eine Frage, bei der sich leicht prüfen lässt, ob eine mögliche auch eine tatsächliche Lösung ist, nicht auch selbst einfach lösen lässt.

Kluge Köpfe behaupten, dass NP-Probleme nicht unbedingt zur Klasse P gehören müssen. Auch wenn es einfach ist, jede vorgeschlagene Lösung eines Problems auf ihre Korrektheit zu prüfen, lässt sich die Aufgabe selbst noch lange nicht dadurch effizient lösen, dass man immer wieder Lösungen rät und sie anschließend überprüft. Das übersteigt einfach alle Möglichkeiten. Stellen Sie sich zum Beispiel vor, Sie würden ein Zahlenschloss dadurch öffnen wollen, dass Sie nach-

Wie sich Briefmarken kombinieren lassen

Nehmen wir an, wir hätten zwei Sorten von Briefmarken zur Verfügung: zu 4 beziehungsweise 5 Cent. Welche Gesamtwerte lassen sich mit ihnen erreichen, und welches ist der größte, der nicht aus ihnen kombiniert werden kann? Offenbar sind folgende Werte möglich:



4
5
8 = 4 + 4
9 = 4 + 5
10 = 5 + 5
12 = 4 + 4 + 4
13 = 4 + 4 + 5
14 = 4 + 5 + 5
15 = 5 + 5 + 5
16 = 4 + 4 + 4 + 4
17 = 4 + 4 + 5 + 4

Die Werte 1, 2, 3, 6, 7 und 11 lassen sich nicht darstellen. Sobald wir aber vier aufeinander folgende Werte (12, 13, 14, 15) erhalten können, nehmen wir jeweils vier dazu und erreichen damit 16, 17, 18, 19, als Nächstes 20, 21, 22, 23 und so weiter – also eine lückenlose Folge. Von 12 an lässt sich demnach jeder Wert erreichen. Die größte unmögliche Zahl ist somit 11.

11 ist aber gleich $4 \cdot 5 - (4 + 5)$, und diese Formel erweist sich als universell. Haben die beiden Markenwerte x und y keinen gemeinsamen Faktor, dann ist der größte mit ihnen nicht erreichbare Wert $x \cdot y - (x + y)$. Mit den Briefmarkenwerten 99 Cent und 101 Cent lässt sich also jeder Wert kombinieren, der größer als $99 \cdot 101 - (99 + 101) = 9799$ Cent ist.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

einander alle Kombinationen ausprobieren. Natürlich verkündet irgendwann ein einfaches »Klick«, dass Sie die korrekte Lösung gefunden haben. Bei einem etwas komplizierteren Schloss jedoch könnten Sie Ihr ganzes Leben mit dem Durchprobieren aller möglichen Kombinationen verbringen, ohne jemals dieses Klick zu hören. Das Passwort eines Computers zu raten, bietet ein weiteres Beispiel für solch ein Problem.

Anlass zu Optimismus

Sogar ohne den Clay-Preis als Ansporn würden wohl die meisten Mathematiker ihr letztes Hemd verkaufen, wenn sie dadurch herausfinden könnten, ob NP tatsächlich verschieden von oder gleich P ist. Auch für die Fachleute ist diese Frage ebenso rätselhaft wie fundamental. Das wirklich Quälende daran ist eine Eigenschaft, die »NP-Vollständigkeit« genannt wird. NP-vollständige Probleme bilden eine spezielle Teilmenge aller NP-Probleme. NP-vollständig sind sie genau dann, wenn eine effiziente Lösung für eines von ihnen dazu dienen kann, auch jedes andere NP-Problem effizient zu lösen.

Anders ausgedrückt: Findet sich ein effizientes Verfahren zur Lösung irgendeines NP-vollständigen Problems, dann hat man bewiesen, dass alle NP-Probleme auch zur Klasse P gehören. Die Sache ist keineswegs rein exotisch: So hat sie beispielsweise Bedeutung für das Thema Sicherheit von Bankgeschäften – das ist schon ein guter Grund, nach einer Lösung zu suchen. Was uns wieder zu unserem Ausgangsthema bringt – den Briefmarken.

Im Jahr 1996 bewies Jorge Ramirez-Alfonsin von der Université Pierre et Marie Curie in Paris, dass die allgemeine Version des Briefmarkenproblems – mit einer unbeschränkten Zahl von Markenwerten – NP-vollständig ist. Falls also für die Frage der Briefmarkenstückelungen eine effiziente Lösungsmethode existiert, dann lässt sich auch jedes andere NP-Problem ebenso ökonomisch lösen.

Tja, gibt es denn nun dafür eine effiziente Methode? Bisher noch nicht, aber zumindest gibt es neuen Anlass zu Optimismus, wenigstens für eine vereinfachte Fassung des Problems. Dabei wird eine Schranke für die Anzahl der Markenwerte zugelassen – drei, vier, zehn, hundert oder irgendeine andere. Allerdings ist das Problem mit einer solchen Schranke, egal wie groß sie auch ist, nicht mehr NP-vollständig. Außerdem lassen sich für das Briefmarkenproblem keine so ein-

Das Briefmarkenproblem hat für jede beliebige Anzahl von Markenwerten eine effiziente Lösung

fachen Lösungsformeln angeben, wie sie Sylvester entdeckt hatte. Komplexere Algorithmen kann man jedoch auf diesen Problemtyp anwenden, und auch sie laufen, im Prinzip jedenfalls, mit polynomialer Rechenzeit. Betrachten wir also solche speziellen Beispiele für unser NP-vollständiges Problem, dann gehören sie zur Klasse P.

Mit der Anzahl von Markenwerten wächst auch die Potenz der Eingabelänge, welche die Rechenzeit bestimmt. Angenommen, für drei Stückelungen könnte man einen Algorithmus finden, dessen Rechenzeit mit der dritten Potenz der Stellenzahl der Markenwerte variiert; für vier Werte würde dies einen Algorithmus liefern, für den die Rechenzeit proportional zur vierten Potenz dieser Anzahl anwächst. Allgemein könnte man dann für n Markenwerte einen Algorithmus finden, dessen Rechenzeit proportional zur n-ten Potenz der Stellenanzahl anwächst.

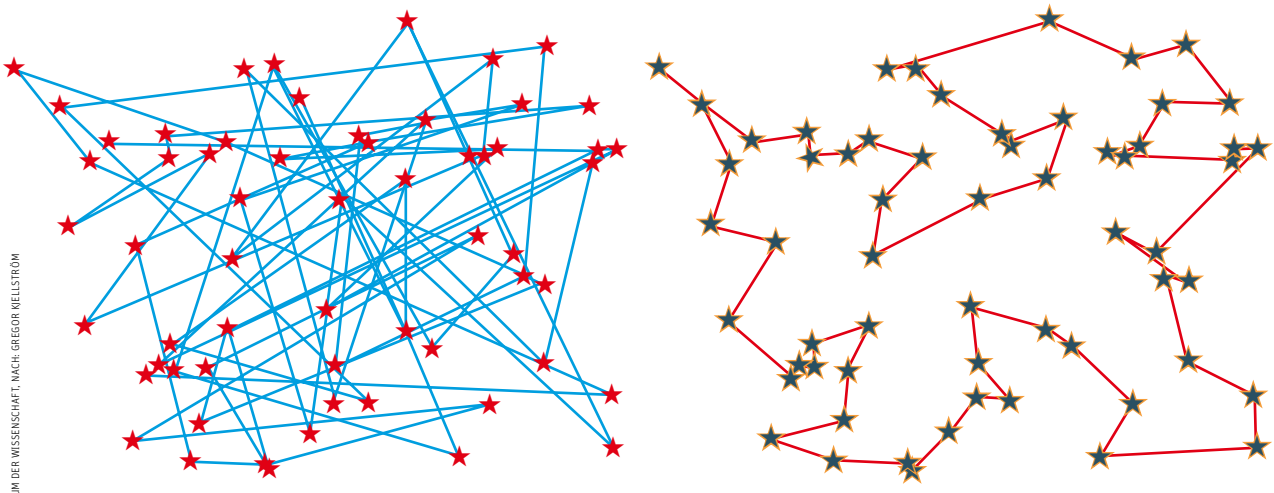
Das ist eine gute Nachricht: Denn grob gesagt gehört bei diesem Szenario jedes einzelne, also das Drei-Marken-, das Vier-Marken- oder auch das 1000-Marken-Problem, zur Klasse P. Tatsächlich hat Ravi Kannan, heute an der Yale University in New Haven, bereits 1992 gezeigt, dass eine effiziente Lösung für jede beliebige Anzahl von Markenwerten existiert.

Leider sind nicht alle Nachrichten so erfreulich. Ramirez-Alfonsins Theorem zeigt nämlich auch, dass sich all die einzelnen Methoden nicht zu einem einzigen Algorithmus bündeln lassen, der unabhängig von der Anzahl der Markenwerte effizient ist. Zusammengefasst zu einem allgemeinen n-Marken-Problem wären sie nicht mehr in der Klasse P, weil es dann für die auftretenden Potenzen keine obere Schranke mehr gäbe. Außerdem zeigt Kannans Theorie, dass ihr theoretischer Begriff von Effizienz nicht unbedingt auch »praktisch« sein muss: Gigantische Exponenten oder Faktoren machen viele seiner guten Überlegungen zunichte. Aus diesem Grund denkt auch niemand ernsthaft daran,

Die Handlungsreise – ein besonders schweres NP-Problem?

Das Problem des Handlungsreisenden (englisch: *travelling salesman problem*) wurde bereits im 19. Jahrhundert diskutiert, in seiner allgemeinen Form aber erst in den 1930ern von dem aus Wien stammenden Mathematiker Karl Menger untersucht. Dabei wird eine Rundreise durch mehrere Orte gesucht mit der Eigenschaft, dass die gesamte Reisestrecke bis zur Rückkehr zum Ausgangsort möglichst kurz ist. Heute steht eine Vielzahl von heuristischen und exakten Methoden zur Verfügung, mit denen auch schwierige Fälle mit mehreren tausend Städten optimal gelöst wurden. Dieses Problem gilt als »NP-schwer«.

Einfach gesagt: Es ist mindestens so komplex (schwer) wie die schwersten Problem in der NP-Klasse. Forscher vermuten daher, dass die längste Laufzeit jedes deterministischen Algorithmus, der für dieses Problem stets optimale Lösungen liefert, im besten Fall »nur« exponentiell mit der Anzahl der Städte variiert. Schon für wenige Städte kann die benötigte Laufzeit eines solchen Algorithmus also unpraktikabel viel Zeit beanspruchen. Das Problem des Handlungsreisenden tritt in vielen praktischen Anwendungen auf, etwa beim Design von Mikrochips, bei der Verteilung von Waren, der Tourenplanung von Kunden- oder Pannendiensten und bei Genomsequenzierung.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: GREGOR KJELLSTRÖM

Eine Reise durch 60 Städte: links mit einem zufälligen, rechts mit einem optimierten Weg

Einige der Mathematiker, die das Sortierproblem vorantrieben (im Uhrzeigersinn): Stan Wagon, Jorge Ramirez-Alfonsin, Ravi Kannan sowie Bjarke Roune

Kannans Methode für ein konkretes Computerprogamm zu benutzen.

Die jüngste Wendung unserer Geschichte ist nun wieder ermutigender. Stan Wagon vom Macalester College in St. Paul, Minnesota, und seine Kollegen können jetzt das Vier-Marken-Problem für Zahlen mit 100 Stellen auf einem schnellen PC in etwa einer Sekunde lösen und das Zehn-Marken-Problem für Zahlen mit zehn Stellen in zwei Tagen. Noch erfolgreicher war Bjarke Roune an der Universität Aarhus. Dem jungen dänischen Computerwissenschaftler gelang es mit Methoden der algebraischen Geometrie auf seinem Rechner, das Vier-Marken-Problem mit 10 000-stelligen Zahlen in wenigen Sekunden und das 13-Marken-Problem für zehnstellige Zahlen in wenigen Tagen zu knacken.

Unsichere Kontodaten

Zwar bleibt das allgemeine *n*-Marken-Problem davon unberührt, aber diese Resultate zeigen zumindest, dass ein NP-vollständiges Problem in vielen konkreten Fällen gelöst werden kann. Man stelle sich einmal vor, eine einzige, »hässliche« Kombination der Markenwerte unter Billionen von Möglichkeiten würde eine ewige Rechenzeit verschlingen, während sich alle übrigen in wenigen Minuten erledigen ließen. Die Wahrscheinlichkeit, gerade auf einen dieser hässlichen Fälle zu stoßen, wäre vernachlässigbar. Obwohl also bei diesem Szenario das allgemeine Problem NP-vollständig ist, könnten sich die meisten konkreten Beispiele bei richtigem Vorgehen als viel einfacher entpuppen.

Dass so etwas passieren kann, zeigt das berühmte »Problem des Handlungsreisenden« (siehe Kasten links) – dabei geht es um die Berechnung des kürzesten Rundwegs durch *n* Städte, der genau einmal durch jede Stadt führt – sowie um andere Probleme aus der Wirtschaftsmathematik. Auch beim Briefmarkenproblem stellt sich heraus, dass konkrete Beispiele einfach lösbar sind. Und das könnte bei anderen NP-vollständigen Problemen ebenso passieren.

All das hat auch praktische Konsequenzen. Selbst wenn das Verfahren, das Ihre Bank einsetzt, um Kontodaten zu verschlüsseln, »im Allgemeinen« NP-vollständig ist – was mehr wäre, als gegenwärtig für die meisten der tatsächlich verwendeten Verschlüsselungsverfahren bewiesen werden kann –, könnte das konkret von Ihrer Bank eingesetzte Verfahren trotzdem unsicher sein. Vermutlich ist das noch kein Anlass, um gleich loszurennen und die Kontoauszüge zu prüfen. Es könnte aber dazu anregen, sich über das Thema »sichere Verschlüsselung« ein paar Gedanken zu machen.

Die neuesten Entwicklungen beim Briefmarkenproblem lassen hoffen, dass viele der Probleme, die bisher als unlösbar galten, dennoch lösbar sind. Schließt man nämlich die seltenen übelsten Szenarios aus und konzentriert man sich auf die Untersuchung der typischen und häufigsten Fälle, dann klappt es ja vielleicht. ◁

Ian Stewart ist Mathematiker, Buchautor und Wissenschaftsjournalist. Er unterrichtet als Professor an der University of Warwick in England. Sein letztes Buch schildert »Die wunderbare Welt der Mathematik« (Piper-Verlag, München 2007).

Clay Mathematics Institute siehe www.claymath.org/millennium/.

Zum Problem des Handlungsreisenden siehe http://de.wikipedia.org/wiki/Problem_des_Handlungsreisenden.

Zur Kompexitätstheorie siehe http://de.wikipedia.org/wiki/Komplexitätstheorie.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965711.

GENE und PFANNKUCHEN

Wie hat man sich gewisse Mutationen im Erbgut von Lebewesen vorzustellen? Ungefähr wie Pfannkuchenwenden – von einem hinreichend abstrakten Standpunkt aus. Die Reihenfolge dieser Mutationen zu rekonstruieren entpuppt sich als ein Problem der höchsten Schwierigkeitsklasse.

Von Brian Hayes

In den 1930er Jahren durchkämmten Forscher des berühmten »Drosophila-Teams« am California Institute of Technology den Westen Amerikas, um Taufliegen für genetische Daten einzusammeln. Bei der Analyse ihrer Fundstücke stießen die Wissenschaftler auf viele »genetische Inversionen«: Blöcke von Genen, die in umgekehrter Reihenfolge auftraten. Hatten etwa die Fliegen einer bestimmten Region einen bestimmten Satz von Genen, etwa *abcdefg*, so trat bei Populationen an anderen Orten die Reihenfolge *dcbaefg* auf. Die ersten vier Buchstaben dieser Sequenz waren darin also spiegelverkehrt angeordnet.

Eine weitere Umkehrung, die einen Genblock an anderer Stelle betraf, konnte daraus die Sequenz *dcfeabg* erzeugen. Theodosius Dobzhansky und Alfred H. Sturtevant, zwei der führenden *Drosophila*-Forscher, wiesen schon damals darauf hin, dass man solche genetischen Veränderungen dazu benutzen könnte, den Familienstammbaum dieser Fliegen zu rekonstruieren. Eine höhere Anzahl von Umkehrungen würde dabei auf eine größere evolutionäre Distanz hindeuten.

Die von Dobzhansky und Sturtevant entdeckten Veränderungen ließen sich auf Umkehrungen von nur ein oder zwei Genblöcken zurückführen. Später, als solche Genreihenfolgen bei einer größeren Zahl von Organismen untersucht wurden, erkannten Forscher komplexere Muster. In den 1980er Jahren maßen D. Palmer und Laura A. Herbon von der University of Michigan das Tempo evolutionärer Veränderungen bei Kohlpflanzen. Sie untersuchten die Erbsubstanz DNA in den Mitochondrien, den Energie erzeugenden Organellen. Dabei entdeckten sie, dass die Gene durch eine Vielzahl von zufälligen Umkehrungen durcheinandergewürfelt waren. Um Kohl in Rüben umzuwandeln, waren mindestens drei Umkehrungen erforderlich. Zwischen entfernteren Verwandten wie Kohl und Senf lagen offenbar mindestens ein Dutzend Gendreher – ihre genaue Zahl ließ sich aber nur schätzen.

Wenn diese genetischen Saltos als biologische Uhr dienen sollten, musste eine verlässliche Methode gefunden werden, sie abzuzählen. Wenn zwei Gensätze vorliegen – etwa *abdcefg* und *febagcd* –, wie lässt sich dann bestimmen, welche Abfolge von Umkehrungen die gesamte Transformation bewirkte? In diesem Beispiel enthält die Lösung genau drei Schritte, die Sie vermutlich mit Papier und

Appetitanregend: Einen Stapel von Pfannkuchen zu sortieren, stellt Mathematiker manchmal vor größte Pobleme – auch wenn sie nicht hungrig sind.

COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK; FOTO: MARK S. WURST / FOTOLIA

Bleistift in einigen Minuten finden könnten. Bei größeren Genomen und längeren umgekehrten Teilabschnitten kommt man jedoch mit dieser Trial-and-Error-Methode schnell ins Schleudern. Was man braucht, ist ein Regelwerk – ein Algorithmus. Preisfrage also: Gibt es einen effizienten Algorithmus, mit dem sich eine Abfolge von Veränderungen aufspüren lässt, die eine gegebene Permutation in eine andere überführt?

Dieses »genetische Inversionsproblem« liegt an der Schnittstelle zwischen Biologie, Mathematik und Computerwissenschaft. Eine Weile schienen die Aussichten, dafür eine einfache und effektive Lösung zu finden, trübe – selbst wenn man die jeweils stärksten Werkzeuge dieser drei Disziplinen einsetzte. Dennoch hat die Geschichte ein Happy End. Bis vor einem Jahrzehnt galten Computerberechnungen von Genumkehrungen noch als schwieriges Tüftlerproblem. Heute indes lassen sie sich so einfach durchführen, dass sie zu einem Standardverfahren wurden. Will man die so genannte Inversionsdistanz zwischen zwei Genomen wissen, besucht man schlicht eine Webseite und erhält in wenigen Sekunden die Antwort.

Wenden mit dem Tortenheber

Ehe wir uns aber hier in langen DNA-Strängen verheddern, wollen wir uns folgender Aufwärmübung widmen: dem Wenden von Pfannkuchen. Gegeben ist ein Stapel aus n Pfannkuchen, alle mit unterschiedlichen Durchmessern. Die Aufgabe lautet, sie der Größe nach zu sortieren, wobei am Ende der größte unten und der kleinste oben liegen soll. Bei jedem Sortierschritt dürfen Sie einen Tortenheber an beliebiger Stelle in den Stapel schieben und den Teilstapel der oberhalb befindlichen Pfannkuchen als Ganzes wenden. Andere Eingriffe in den Stapel sind nicht erlaubt. Wie viele Wendevorgänge sind erforderlich, um die Pfannkuchen vollständig zu sortieren?

Hier ein möglicher Algorithmus zum Sortieren der Pfannkuchen: Suche im Stapel zunächst den größten Pfannkuchen, schiebe den Tortenheber unter ihn und wende den darüber befindlichen Stapel. Nun liegt der größte Pfannkuchen oben. Wendet man anschließend den gesamten Stapel aus n Pfannkuchen, so liegt der größte Pfannkuchen an seiner Sollposition, nämlich ganz unten. Von nun an darf dieser unterste Pfannkuchen nicht mehr bewegt werden. Wähle nun den zweitgrößten Pfannkuchen, drehe ihn und alles Darüberliegende um, so dass er oben liegt. Wende anschließend $n-1$ Pfannkuchen, um den zweitgrößten an seine Sollposition über dem größten zu bringen. Anschließend bringt man den drittgrößten nach oben, wendet $n-2$ Pfannkuchen – und so weiter, bis der gesamte Stapel sortiert ist. Um jeden Pfannkuchen an die richtige Stelle zu bringen, benötigt man genau zwei Wendevorgänge. Daher erfordert der gesamte Sortierakt $2n$ Schritte. (Oder vielleicht $2n-1$; oder $2n-3$, denn einige der letzten Wendevorgänge sind nicht wirklich nötig.)

Dieser Algorithmus liefert jedenfalls eine Obergrenze für die Zahl der Wendeaktionen. Er zeigt, dass das Sortieren des Stapels nicht mehr als maximal $2n$ Schritte erfordert. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass andere Methoden effektiver sind. In den 1970er Jahren fanden Christos H. Papadimitriou und William H. Gates, damals beide an der Harvard University, ein effizienteres Verfahren. Mit dem Gates-Papadimitriou-Algorithmus ließ sich der Pfannkuchenstapel in $(5n+5)/3$ Schritten sortieren, was für große n mit $5n/3$ angenähert werden kann.

Gates, besser bekannt als langjähriger Chef der Firma Microsoft, und Papadimitriou zeigten außerdem, dass es auch eine untere

Zwischen Kohl und Senf liegen schätzungsweise ein Dutzend Vertauschungen von Genabschnitten

Wohl geordnet nach Größe ist dieser Pfannkuchenstapel. Doch mathematisch ist das Sortierproblem noch ungelöst.

FOTO: MARK S. WURST / FOTOLIA; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Grenze gab, wonach einige Stapel in nicht weniger als $17n/16$ Schritten gewendet werden können. Seitdem wurde die untere Grenze leicht auf $15n/14$ erhöht. Für den praktischen Umgang mit Pfannkuchen ist diese Aufwandsschätzung – mindestens $15n/14$, höchstens $5n/3$ – sicherlich genau genug. Mathematisch betrachtet hingegen blieb das Pfannkuchenproblem ungelöst. Die exakte Zahl der Wendeschritte zum Sortieren von n Pfannkuchen ist noch immer unbekannt.

Das Gen-Umkehren und das Pfannkuchen-Wenden haben vieles gemeinsam. Es gibt aber auch Unterschiede: Bei den Pfannkuchen darf man nicht in der Mitte des Stapels die interne Reihenfolge verändern. Man darf nur die Pfannkuchen von der Einstichstelle bis oben wenden. Bei Genen, die innerhalb eines Chromosoms aufgereiht sind, besteht kein Grund, solche Einschränkungen vorzugeben. Jeder Genblock kann umgedreht werden, egal, ob er sich am Ende oder innerhalb eines Chromosoms befindet. Diese zusätzlichen Möglichkeiten sollten das Permutieren von Genen einfacher machen als das Wenden von Pfannkuchen.

Mutationen als Zeitmaß

Dafür ist das genetische Problem auf andere Weise schwierig. Das Sortieren der Pfannkuchen wurde meist als so genannte Worst-Case-Studie angegangen. Die Forscher suchten nicht unbedingt nach der Anzahl erforderlicher Wendeschritte für einen bestimmten Stapel mit n Pfannkuchen. Stattdessen berechneten sie, wie viele Schritte für einen Stapel aus n Pfannkuchen maximal nötig sind. Bei der Lösung des Genproblems muss man anders vorgehen: Ein Genetiker möchte gern wissen, wie viele Umkehrereignisse zwischen natürlich vorkommenden Genkonfigurationen liegen. Zu wissen, wie groß der Maximalabstand – gemessen in Umkehrschritten – zwischen zwei beliebigen Chromosomen mit n Genen ist, nützt ihm weniger.

Den Genen der Taufliege geben die Genetiker gerne blumige Namen wie *groucho*, *kojak* oder *dreadlocks* (Rastalocken). Für algorithmische Analysen ist es jedoch viel bequemer, sie einfach durchzunummerieren. So betrachtet ist ein Chromosom nichts anderes als eine beliebige Anordnung (Permutation) der Zahlen von 1 bis n.

Das Ziel ist eine Methode, mit der sich die Umkehrdistanz zwischen zwei beliebigen Permutationen ermitteln lässt – etwa 31524 und 41235. Da die Bezeichnung der Gene beliebig ist, können wir ihnen die Nummern immer so zuweisen, dass eine Konfiguration der kanonischen Permutation $123\ldots n$ entspricht, mit den Zahlen in aufsteigender Reihenfolge. Die Aufgabe besteht dann einfach darin, die andere Permutation zu sortieren, das heißt eine Abfolge von Umkehrungen zu finden, die sie in die kanonische Reihenfolge überführt. Statt 41235 in 31524 zu konvertieren, können wir die Sequenz 52413 in die kanonische Reihenfolge 12345 bringen; die dafür erforderlichen Operationen sind identisch.

Kann jede Permutation durch eine Anzahl von Umkehrschritten sortiert werden – ohne jegliche andere Operationen? Die Antwort liefert eine einfache Variante des Pfannkuchen-Wende-Algorithmus. Für jede beliebige Ausgangskonfiguration gibt es einen Genblock, dessen Inversion Gen 1 in die korrekte Position links außen bringt. Danach muss ein weiterer Block gespiegelt werden, was Gen 2 in die gewünschte Position bringt; dabei bleibt die Position von Gen 1 unverändert. Hier ist die komplette Abfolge von Umkehrungen, um unsere Beispielzahlen zu sortieren (die unterstrichenen Partien werden jeweils beim nächsten Schritt gespiegelt):

$$\underline{5\,2\,4\,1}\,3$$
$$1\,\underline{4\,2}\,5\,3$$
$$1\,2\,\underline{4\,5\,3}$$
$$1\,2\,3\,\underline{5\,4}$$
$$1\,2\,3\,4\,5$$

Mit diesem von links nach rechts fortschreitenden Algorithmus können die fünf Gene in vier Umkehrschritten sortiert werden. Es ist nicht schwer zu erkennen, dass sich jede beliebige Anordnung der n Elemente in höchstens $n-1$ Umkehrschritten sortieren lässt. Diese Prozedur ähnelt unserem Pfannkuchen-Algorithmus. Da wir jedoch nicht nur von einem Ende des Chromosoms her arbeiten müssen, kann jedes Gen mit nur einem Schritt in seine Position gebracht werden statt mit zwei.

Der »Von-links-nach-rechts«-Algorithmus liefert jedoch nicht immer die kleinstmögliche Zahl von Umkehrschritten zur Sortierung eines Chromosoms. Die vier Schritte im obigen Beispiel sind nicht das Minimum. Es gibt eine Möglichkeit, dieselbe Aufgabe in nur drei Schritten zu lösen:

$$5\,2\,\underline{4\,1}\,3$$
$$\underline{5\,2\,1}\,4\,3$$
$$1\,2\,\underline{5\,4\,3}$$
$$1\,2\,3\,4\,5$$

Hinter dieser Vorgehensweise steckt jedoch keine bestimmte Logik. Die Frage lautet daher: Wie kann man solche kürzeren Schrittfolgen finden? Und wie erkennt man, dass man den minimal möglichen Weg gefunden hat? Die kürzeste Umkehrsequenz zu finden

DIE MOLEKULARE UHR

Schon in den 1930er Jahren schlugen Genforscher vor, Mutationen im Erbgut als molekulare Uhr der Evolution zu benutzen.

Die Grundannahme lautet: Das Leben ist monophyletisch – je zwei Arten besitzen immer einen gemeinsamen Vorläufer.

Verändern sich Proteine mit konstanter Geschwindigkeit, dann lässt sich anhand der Divergenz der Zeitpunkt der evolutionären Trennung – und somit der **letzte gemeinsame Vorfahr** – berechnen.

Die Genauigkeit dieser Uhr hängt von der zeitlichen Eichung durch fossile Funde ab. So spielen unterschiedliche Geschwindigkeiten bei der Evolution eine Rolle. Sie verläuft bei Primaten deutlich langsamer als etwa bei Nagern.

ist nicht deshalb wichtig, weil wir einen Hochleistungsalgorithmus zum Sortieren von Genen brauchen. Das Sortieren der Gene ist nicht das Hauptanliegen. Der kürzeste Weg ist vor allem deshalb von Bedeutung, weil er den besten Schätzwert für die tatsächliche Umkehrdistanz zwischen zwei Genomen liefert – also das Maß ihrer evolutionären Verwandtschaft.

Im Allgemeinen lässt sich der Ablauf eines evolutionären Prozesses nicht mit Sicherheit rekonstruieren, doch das Prinzip der einfachsten Erklärung (»Occams Rasierer«) spricht dafür, dass kurze und direkte Wege wahrscheinlicher sind als lange, zickzackartige. Ein Wechsel in der Gen-Reihenfolge von 123 nach 321 könnte zwar durch die mehrstufige Transformation 123 –> 213 –> 312 –> 321 entstanden sein, doch der direkte Einzelschritt 123 –> 321 ist meist die bessere Vermutung. Daher nehmen die Biologen stets den kürzesten Weg als Indiz für die Stammesgeschichte. (Dieser Weg ist übrigens nicht immer eindeutig bestimmt; manchmal gibt es mehrere Umkehrwege mit der gleichen minimalen Länge.)

Um einen Überblick über Sortierprozesse durch Umkehrungen zu gewinnen, lohnt sich ein Blick in die Arbeiten von John Kececioglu, zurzeit an der University of Arizona, und David Sankoff von der Unversity of Ottawa. Sie sind zwar nicht die Ersten, die über das Problem schrieben, aber sie sind diejenigen, die dabei erste nennenswerte Fortschritte erzielten. Das wichtigste Werkzeug ihrer in den frühen 1990er Jahren begonnenen Arbeiten ist das Konzept der Bruchstelle.

Optimales Sortieren

Eine Bruchstelle tritt immer dort auf, wo zwei nicht direkt benachbarte Zahlen zusammentreffen. So hat beispielsweise die folgende achtelementige Permutation zwei Bruchstellen, die mit [^] gekennzeichnet sind:

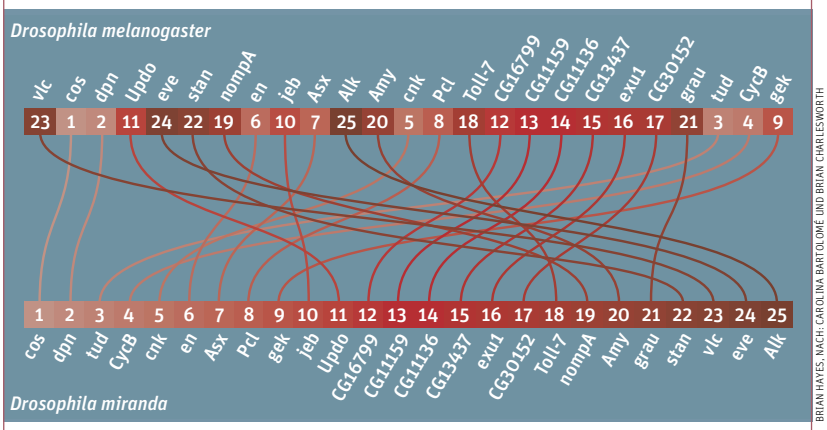
$$2\ 1_{\wedge}6\ 5\ 4\ 3_{\wedge}7\ 8.$$

Ein nicht von Bruchstellen unterbrochener Abschnitt wird als Strip (Streifen) bezeichnet; dieser besteht aus aufeinander folgenden Zahlen in aufsteigender oder absteigender Reihenfolge. Kanonische Permutationen zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine Bruchstellen haben. Daher kann jeder Prozess, der die Bruchstellen völlig beseitigt, eine Sortiermethode für Permutationen sein. (Eine Komplikation dabei ist, dass die Permutationen 123…n und n…321 beide keine Bruchstellen haben. Abhilfe schafft hier, die Sequenz am Anfang und am Ende durch die »Ankerelemente« 0 und $n+1$ zu erweitern, die den Sortieralgorithmus zwingen, auf die Aufwärts-

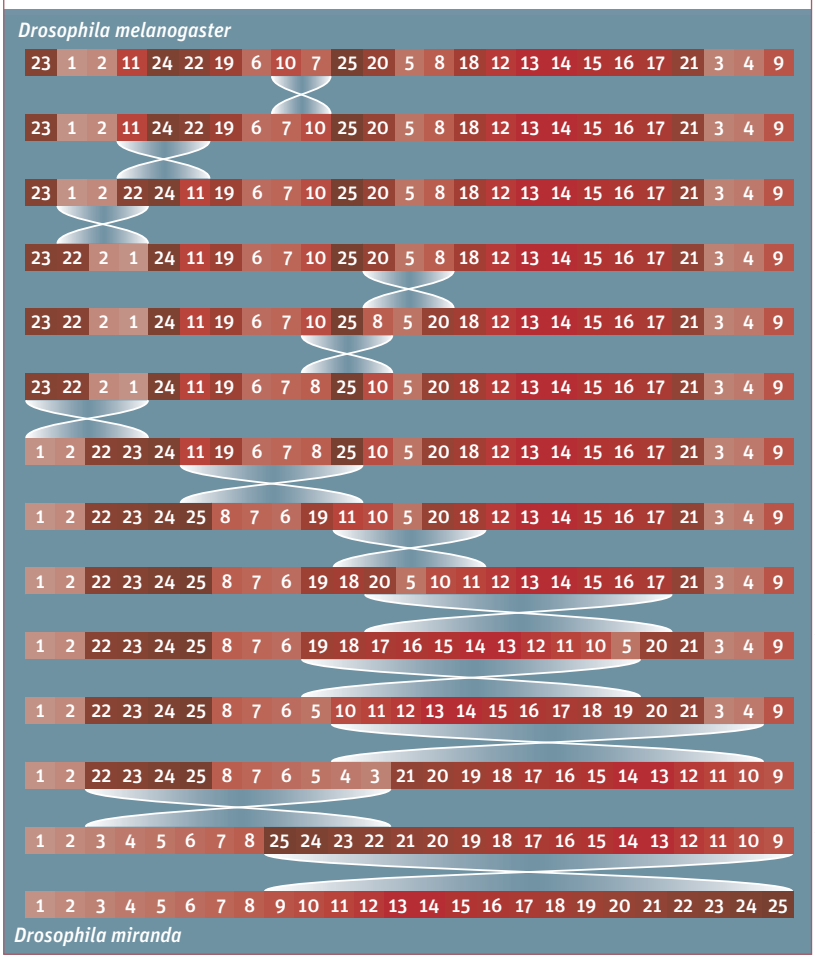
Genmutationen bei der Taufliege

Zwei Arten der Gattung *Drosophila* besitzen denselben Satz von Genen, jedoch in unterschiedlicher Reihenfolge. Ursache sind gelegentliche »Inversionen«, wobei jeweils ein Block benachbarter Gene um 180 Grad verdreht wird. Welche Folge von Inversionen die eine Sequenz in die andere überführt, ist keineswegs offensichtlich. Die Gene von *D. miranda* sind willkürlich durchnummeriert, um als kanonische Folge zu dienen.

Die minimale Anzahl von Vertauschungen, die nötig ist, um die Sequenz von *D. melanogaster* in die von *D. miranda* zu überführen, dient als Maß für ihren evolutionären Abstand. Wie die Abfolge von oben nach unten zeigt, gelingt dies hier in 13 Einzelschritten. Diese Vertauschungssequenz, erzeugt vom Grimm-Programm, ist vermutlich nicht eindeutig.



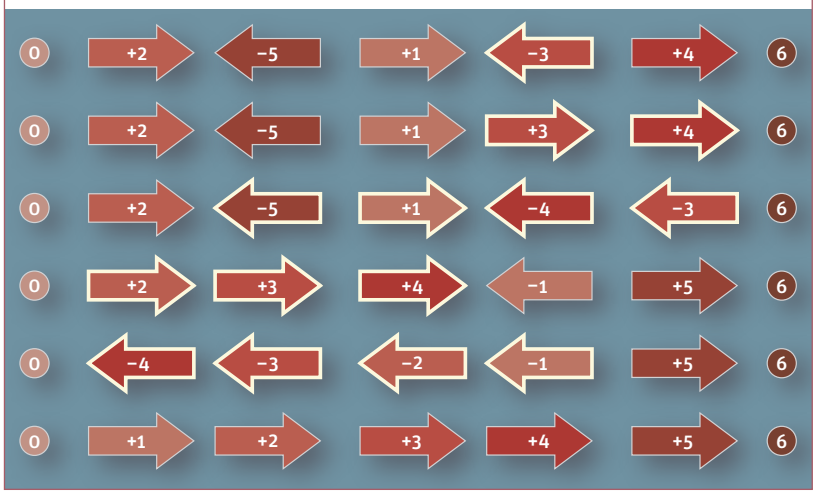
BRIAN HAYES, NACH: CAROLINA BARTOLOMÉ UND BRIAN CHARLESWORTH



BRIAN HAYES UND GRIMM (EINE SOFTWARE VON GLENN TESLER, UCSD)

Mutationen mit Orientierung

Umkehrungen mit Vorzeichen berücksichtigen nicht nur die Position jedes Gens, sondern auch seine Orientierung. Algorithmen zur Sortierung von Genen berücksichtigen diese Orientierung durch ein Plus- oder Minuszeichen. Eine Umkehrung verkehrt nicht nur jeden Block in sein Spiegelbild, sondern vertauscht auch alle Vorzeichen. In der Grafik wird eine mit Vorzeichen versehene Permutation aus fünf Elementen in fünf Schritten sortiert. In jeder Zeile sind die als Nächstes zu spiegelnden Gene durch hellen Rand gekennzeichnet. Die Ankerelemente 0 und 6 dienen der Verankerung der Genenden (sie werden nicht bewegt), was die Links-rechts-Symmetrie aufhebt.



BRIAN HAYES

ALGORITHMEN ZUM SORTIEREN

Die Mathematik bietet je nach Problemstellung für jeden Geschmack zahlreiche Varianten, um *n* Elemente zu sortieren.

Ein **allgemeines Sortierverfahren**, so bemerkt der Informatiker Helmar Burkhart von der Universität Basel, kann im *worst case* nicht besser als mit einer Laufzeit proportional zu ($n \log n$) sortieren, im *best case* proportional zu *n*.

Bei **Parallelrechnern** kann die Rechenzeit im besten wie im schlechtesten Fall höchstens auf einen Wert reduziert werden, der mit $\log n$ wächst.

Helmar Burkharts Webseite:
www.sortieralgorithmen.de

richtung hinzuarbeiten, aber selbst nicht bewegt werden.)

Die Analyse der Bruchstellen legt eine untere Grenze für die Komplexität von Umkehrsortierungen nahe. Nur an den Enden des gespiegelten Abschnitts kann eine Umkehrung Bruchstellen erzeugen oder beseitigen. Daraus folgt, dass sich mit einem einzelnen Schritt höchstens zwei Bruchstellen eliminieren lassen. Wenn also die ursprüngliche Permutation *m* Bruchstellen hat, gibt es keine Sortierprozedur, die diese in weniger als $m/2$ Umkehrschritten beseitigt.

Kececioglu und Sankoff erdachten ein Sortierverfahren, das sich diesem Minimalwert bis höchstens auf den Faktor 2 annähert. Mit anderen Worten: Die maximale Zahl von Umkehrungen dieses Algorithmus ist nicht größer als die Zahl der Bruchstellen in der ursprünglichen Permutation. Das Verfahren basiert auf einer »gierigen« Strategie: Bei jedem Rechenschritt maximiert es die Zahl der eliminierbaren Bruchstellen. Sieht es eine Möglichkeit, zwei Bruchstellen zu beseitigen, wird dieser Schritt vor anderen Umkehrungen bevorzugt, die nur eine Bruchstelle beseitigen.

Beim Sortieren von Permutationen konzentriert man sich sinnvollerweise auf Bruchstellen. Letztlich sind Bruchstellen die Positionen, wo die Zahlen »in Unordnung« sind, während sie innerhalb der Strips bereits sortiert sind. Damit liegt eigentlich nahe, dass optimale Sortieralgorithmen nur an Bruchstellen ansetzen und niemals innerhalb der Strips. Leider ist dieser Schluss falsch. So hat etwa die Permutation 3412 nur eine einzige Bruchstelle – zwischen 4 und 1. Sortiert man sie mit einem Algorithmus, der niemals Strips unterteilt, so benötigt man drei Umkehrungen: $\underline{34}12 \rightarrow 43\underline{12} \rightarrow \underline{4321} \rightarrow 1234$. Doch eine andere Folge erreicht dies in nur zwei Schritten: $\underline{341}2 \rightarrow 1\underline{432} \rightarrow 1234$.

Kececioglus and Sankoffs gieriger Algorithmus läuft zwar schnell, liefert aber nur näherungsweise korrekte Ergebnisse. Die beiden Forscher entwickelten auch ein Programm, das den umgekehrten Weg geht – zwar die optimale Sortiersequenz findet, dafür aber viel Rechenzeit und Speicherplatz erfordert. Kern dieses Algorithmus ist eine Routine, die alle möglichen Umkehrreihenfolgen zur Bereinigung einer vorgegebenen Permutation untersucht. Doch die Zahl der möglichen Umkehrsequenzen steigt exponentiell mit *n*; schlimmstenfalls kann die Wachstumsrate sogar n^n übersteigen. Mit einem speziellen Ansatz konnten Kececioglu and Sankoff die Zahl der zu untersuchenden Sequenzen zwar deutlich reduzieren. Doch im schlechtesten Fall bleibt ihr Verfahren immer noch exponentiell wachsend. Konkret konnte ihr Programm nur Lösungen bis zu $n = 30$ errechnen.

Eine wirklich harte Nuss

1995 kamen Kececioglu and Sankoff zu dem Schluss, dass optimale Umkehrsortierungen zur Klasse der »NP-schwer« *(NP-hard)* genannten Computerprobleme zählen (siehe den Artikel S. 74). Das sind Fragen, für die – außer durch Wunder – nur Lösungsmethoden gefunden werden können, deren Rechenzeit exponentiell mit *n* steigt. Zwei Jahre später bewies Alberto Caprara von der Universität in Bologna, dass das Auffinden kürzester Umkehrsequenzen für zufällige Permutationen in der Tat ein NP-schweres Problem ist.

Wenn ein Rätsel sich nicht einfach lösen lässt, sucht man sich dann ein einfacheres aus? Hier war das Gegenteil der Fall. Die Forscher konzentrierten sich auf eine kompliziertere Variante des Umkehr-Sortier-Problems. Und erstaunlicherweise fanden sie schon bald brauchbare Lösungen. Außerdem liefert diese Variante ein realitätsnäheres Modell der Prozesse, die Gene durcheinanderwürfeln.

Um diese seltsame Wende zum Besseren erklären zu können, sind einige elementare Fakten über genetische Information hilfreich. Jedes Gen eines Chromosoms hat nicht nur

eine Position, sondern auch eine Orientierung. Stellen Sie sich ein Gen als Pfeil vor statt nur als linearen Abschnitt. Wie die Buchstaben eines Wortes in einem Text kann die Reihenfolge der Nukleotide in einem DNA-Strang nur in eine Richtung korrekt gelesen werden. Wenn daher zwei Genome verglichen werden sollen, müssen sowohl die Reihenfolge der Gene innerhalb des Chromosoms als auch die Ausrichtung jedes einzelnen Gens übereinstimmen. In der Frühzeit der Genforschung wurden solche Ausrichtungen nicht untersucht und diese Eigenschaft mithin ignoriert. Dank Laborgeräten, die Nukleotidsequenzen direkt aus DNA-Molekülen ablesen können, sind Orientierungsdaten immer häufiger erhältlich.

Drehen von verbrannten Pfannkuchen

Ein Chromosom mit orientierten Genen entspricht einer mit Vorzeichen versehenen Permutation, bei der jedem Element der Reihe 1, 2, 3, ... n ein Plus- oder Minuszeichen vorangestellt wird. Gene mit einer bestimmten Ausrichtung erhalten ein Pluszeichen, die mit der entgegengesetzten Ausrichtung ein Minuszeichen. Die Umkehrung eines Genblocks spiegelt nicht nur dessen interne Reihenfolge, sondern dreht auch alle Vorzeichen um. So ändert sich beispielsweise die Permutation $+3-1-2+4$ in $-4+2+1-3$. Um mit Vorzeichen versehene Permutationen zu sortieren, ist eine Reihe von Umkehrungen zu finden, die nicht nur die Gene in aufsteigender Ordnung sortieren, sondern auch alle Vorzeichen positiv machen. Um in die Küche zurückzukehren: Dort gibt es das vergleichbare »Problem der verbrannten Pfannkuchen«. Dabei müssen die Pfannkuchen nicht nur der Größe nach sortiert werden, sondern zusätzlich so, dass die verbrannte Seite stets unten liegt.

Der gesunde Menschenverstand sagt einem, dass mit Vorzeichen versehene Permutationen schwieriger zu sortieren sein sollten als gewöhnliche. Schließlich gibt es mehr Variablen mit mehr Nebenbedingungen. Das Problem bei dieser Überlegung ist nicht, dass sie falsch wäre, sondern dass sie die falsche Frage beantwortet. Im Allgemeinen ist es zwar schwieriger, mit Vorzeichen versehene Permutationen zu sortieren als gewöhnliche. Gesucht ist aber nicht die Sortierung des Genoms, sondern die Zahl der Umkehrungen, die dafür erforderlich sind – und die ist in der Tat einfacher zu berechnen, wenn die Permutationen Vorzeichen haben.

Eine Idee, die überkommene Vorstellungen von Umkehrsortierungen auf den Kopf stellte, kam von Pavel A. Pevzner von der University of California in San Diego, Vineet Bafna, ebenfalls aus San Diego, sowie Sridhar Hannenhalli von der University of Pennsylvania. Die Forscher präsentierten ihren Sortieransatz in der Form der mathematischen Graphentheorie – der Wissenschaft von Punkten und Linien. Die Abbildung unten zeigt einige der Graphen, die bei dieser Sortiermethode genutzt werden. Der Prozess ist knifflig, da unter anderem eine mit Vorzeichen versehene Permutation der Zahlen 1 bis n durch eine gewöhnliche Permutation der Zahlen von 1 bis $2n$ ersetzt wird.

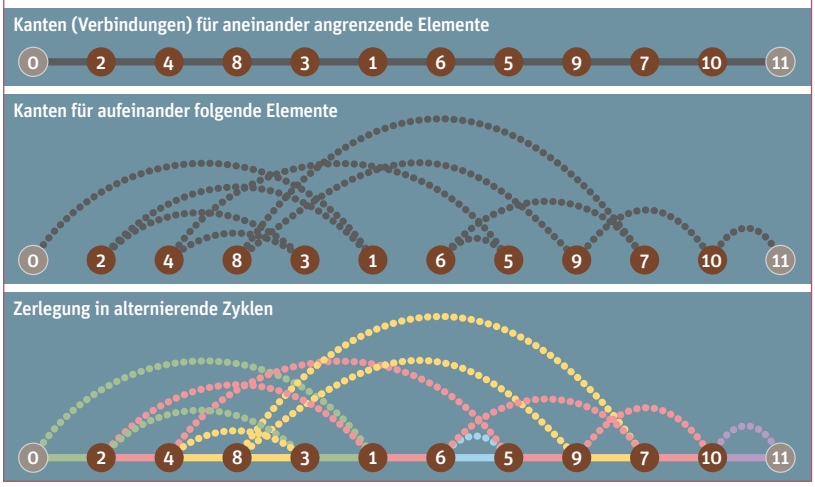
Kürzlich legte Anne Bergeron von der kanadischen Université du Québec eine Variante desselben Algorithmus vor, den sie direkter durch die ursprüngliche, mit Vorzeichen versehene Permutation ausdrückte. Die folgende Darstellung basiert auf Bergerons Arbeit.

Das Konzept basiert auf »orientierten Paaren« – jeweils zwei Zahlen, die irgendwo innerhalb der Permutation vorkommen, unterschiedliche Vorzeichen haben, aber numerisch aufeinander folgen, wenn man das Vorzeichen ignoriert. Bergeron fiel auf, dass eine Umkehrung, die diese Zahlen zusammenbringt, ihnen

Die Suche nach kürzesten Umkehrsequenzen von zufälligen Permutationen ist ein besonders schweres Problem

Der Abstand zwischen zwei Sequenzen

Die Graphentheorie bildet die mathematische Grundlage zur Berechnung von Umkehrdistanzen. Ein Graph besteht aus Knoten und Kanten (Linien zwischen den Knoten). In diesem Graphen aus zehn Knoten ohne Vorzeichen (mit zusätzlicher Verankerung durch die flankierenden Elemente 0 und 11) gibt es zwei Arten von Kanten. Durchgezogene Kanten (oben) verbinden jedes Element mit seinem unmittelbaren Nachbarn; gepunktete Kanten (Mitte) verbinden Knoten in der numerischen Reihenfolge. Für die Analyse der Umkehrungen interessieren die »alternierenden Zyklen«: geschlossene Schleifen, die erst eine durchgezogene Kante durchlaufen, dann eine gepunktete Kante und so fort. Eine Umkehrung kann jedes Mal höchstens einen Zyklus zerstören oder erzeugen. Daher liefert die Zahl der Zyklen einen Schätzwert für die Umkehrdistanz. Hier wurden fünf Zyklen erkannt (unten). Doch bei Knoten ohne Vorzeichen stellt das Auffinden der maximalen Zerlegung in Zyklen selbst wieder ein schwieriges Problem.



BRIAN HAYES

Das Sortierproblem ist ein Modellfall für gelungene interdisziplinäre Zusammenarbeit

zugleich identische Vorzeichen gibt. Ein Beispiel: Nehmen wir die aus sechs Elementen bestehende Permutation 0 + 3 + 1 + 6 + 5 – 2 + 4 + 7 (hier gezeigt mit den Ankerelementen 0 und 7 außen, die niemals bewegt werden). Diese Permutation hat zwei orientierte Paare, nämlich + 3 – 2 und + 1 – 2, und beide können in zweierlei Weise zusammengeführt werden. Kehrt man etwa den Abschnitt + 6 + 5 – 2 um, bringt man 1 und 2 in der korrekten Reihenfolge zusammen und erhält beide mit einem Plus als Vorzeichen. Eine Umkehrung des Abschnitts + 3 + 1 + 6 + 5 erzeugt hingegen die Zahlenfolge – 3 – 2.

Simpel, aber erstaunlich erfolgreich

Bergeron verwendet deterministische Regeln, um orientierte Paare aufzuspüren und um festzulegen, welches Paar als Nächstes zusammengeführt werden soll. Die Regeln bevorzugen Umkehrungen, aus denen positive Zahlen in aufsteigender Reihenfolge und negative Zahlen in absteigender Reihenfolge hervorgehen. Weiterhin präferieren sie Umkehrungen, welche ein Maximum an orientierten Paaren erzeugen. In diesem Beispiel erhält die Umkehrung des Abschnitts + 3 + 1 + 6 + 5 die höchste Präferenz, da sie vier orientierte Paare erzeugt. Nun kann die Regel erneut angewandt werden, um die nächste optimale Umkehrung zu suchen. So lässt sich die Originalpermutation in insgesamt fünf Schritten in eine kanonische umwandeln:

$$
\begin{array}{l}
0\ \underline{+3\ +1\ +6\ +5}\ -2\ +4\ +7 \\
0\ -5\ -6\ -1\ \underline{-3\ -2}\ +4\ +7 \\
0\ -5\ -6\ \underline{-1}\ +2\ +3\ +4\ +7 \\
0\ -5\ \underline{-6\ +1\ +2\ +3\ +4}\ +7 \\
0\ \underline{-5\ -4\ -3\ -2\ -1}\ +6\ +7 \\
0\ +1\ +2\ +3\ +4\ +5\ +6\ +7
\end{array}
$$

Damit hat man die kürzestmögliche Sortiersequenz.

Bergerons Prozedur führt zwangsläufig zu einer Permutation, in der alle Elemente Plusvorzeichen haben. Normalerweise ist dies auch die kanonische Sequenz – und die Sortieraufgabe ist damit erledigt. Es gibt jedoch spezielle Permutationen, bei denen der Algorithmus scheitert und weitere Schritte nötig werden. Dies ist kein Fehler von Bergerons Verfahren, sondern liegt am Algorithmus selbst. Genauer: Es lässt sich auf bestimmte, manchmal auftretende Merkmale der Graphen zurückführen, welche die Permutationen beschreiben. Pevzner und Kollegen bezeichneten diese obskuren Fälle als Hürden, und es gibt sogar noch seltenere Stolpersteine, die die Forscher Superbarrieren oder Festungen genannt haben. In einer frühen Version des Algorithmus ließen sich diese Hürden nicht überwinden. Später jedoch entdeckten Hannenhalli und Pevzner raffinierte Abhilfen, mit denen sich alle Arten von Hindernissen aus dem Weg räumen ließen. Daher erfolgt die Messung der Umkehrentfernungen nun exakt.

Der von Hannenhalli und Pevzner publizierte Algorithmus findet die optimale Umkehrsequenz in einer Zeitspanne proportional zu n^4. Andere Forscher konnten den Wert bald auf n^3 und n^2 senken. Eric Tannier und Marie-France Sagot von der französischen Université Claude Bernard halten zurzeit offenbar den Rekord: $n \sqrt{n} \log n$. Will man einfach nur die Länge der kürzesten Umkehrsequenz wissen (ohne die Sequenz selbst), gibt es ein lineares Verfahren, dessen Rechenaufwand proportional zu n selbst ist. Sogar der langsamste dieser Algorithmen ist noch deutlich effektiver als alle exponentiellen Methoden, und der hat sich auch schon bei praktischen biologischen Problemen bewährt.

Einige Informatiker haben Umkehrsortieralgorithmen als Public-Domain-Software verfügbar gemacht, beispielsweise auf einer Webseite namens Grimm (http://grimm.bioprojects.org/Grimm), die Glenn Tesler von der University of California in San Diego eingerichtet hat. Das Programm berechnet die optimale Umkehrsequenz für zwei beliebige mit Vorzeichen versehene Permutationen. Eher der Unterhaltung dient eine interaktive Grafik auf meiner Webseite (www.sigmaxi.org/4lane/eneg/Eneg.html), mit der jeder selbst eine optimale Sortiersequenz für kleine Zufallspermutationen kreieren kann.

Die jahrzehntelangen Bemühungen, Umkehrsortierprobleme zu lösen, sind ein Modellfall für gelungene interdisziplinäre Zusammenarbeit. Die Fragen waren zunächst nur für Biologen von Bedeutung, erregten aber bald auch das Interesse von Mathematikern und Computerwissenschaftlern.

Doch die Biologie steht noch vor weiteren Herausforderungen. So geht etwa die theoretische Version des Sortierproblems von der Annahme aus, dass alle Abschnitte eines Chromosoms eine ähnlich hohe Wahrscheinlichkeit für Umkehrungen aufweisen. Biologen wissen jedoch, dass bestimmte Abschnitte oder Verbindungen zwischen Abschnitten bevorzugt vertauscht werden. Außerdem sind Umkehrungen von Chromosomenabschnitten nicht die einzige Möglichkeit, das Genom zu verändern. Auch Kreuzungen, Teilungen und Verschmelzungen sind zu berücksichtigen. Gene werden verdoppelt oder eliminiert. Die DNA ist letztlich keine Permutation von mit Vorzeichen versehenen Zahlen. Dennoch erstaunt, wie viel man mit solchen simplen Modellen herausfinden kann. ◁

Brian Hayes ist Senior Writer beim »American Scientist«. Seine Blogseite steht unter http://bit-player.org.

© American Scientist (www.americanscientist.org)

Bartolomé, C., Charlesworth, B.: Rates and Patterns of Chromosomal Evolution in *Drosophila pseudoobscura* and *D. miranda*. In: Genetics 173, S. 779 – 791, 2006.

Bergeron, A.: A Very Elementary Presentation of the Hannenhalli-Pevzner Theory. In: Discrete Applied Mathematics 146, S. 134 – 145, 2005.

Berman, P., Hannenhalli, S.: Fast Sorting by Reversal. In: Proceedings of the 7th Symposium on Combinatorial Pattern Matching, S. 168 – 185. Springer, Berlin 1996.

Tesler, G.: GRIMM: Genome Rearrangements Web Server. In: Bioinformatics 18, S. 492 – 493, 2002. Siehe auch www-cse.ucsd.edu/groups/bioinformatics/GRIMM/index.html.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965712.

KÄLTETECHNIK

Immer schön cool bleiben

Ein steter Kreislauf von Verdampfen und Verflüssigen hält Lebensmittel länger frisch.

Von Bernhard Gerl

Zwischen Kochshow und Mikrowelle, Geschmacksexplosion und Fastfood-Routine erstreckt sich ein kulinarisches Universum, das wesentlich von moderner Kältetechnik profitiert. Sie verhindert, dass Nahrungsmittel »schlecht werden«, also durch Bakterien und Schimmelpilzbefall verderben, und sie bewahrt Aromen, Spurenelemente und Vitamine vor dem Zerfall. Denn Mikroorganismen vermehren sich weniger, chemische Umwandlungsprozesse verlangsamen sich bei niedrigen Temperaturen.

So haben Ernährungsexperten der Universität Hamburg am Institut für Lebensmittelchemie und Biochemie herausgefunden, dass vom Vitamin-C-Gehalt grüner Bohnen nach einer Woche bei einer Umgebungstemperatur von 20 Grad Celsius (°C) knapp ein Fünftel der Ausgangskonzentration übrig ist. Ein Kühlschrank drosselt den Zerfallsprozess und bewahrt 35 Prozent, eine Gefriertruhe mit –18 °C sogar gut 92 Prozent. Tiefgefrorene Bohnen enthalten nach einem Jahr noch 88 Prozent des ursprünglichen Vitamin C, während das industrielle Einkochen in Dosen oder Gläser maximal 29 Prozent übrig lässt.

Wer Lebensmittel selbst einfriert, weiß, dass das darin enthaltene Wasser Eis bildet. Weil es sich aber beim Gefrieren ausdehnt, platzen Zellen – nach dem Auftauen ist beispielsweise Gemüse oft matschig. Industriell werden Lebensmittel deshalb schockgefrostet: Mit flüssigem Kohlendioxid (–78 °C) oder Stickstoff (–196 °C) besprüht, fällt die Temperatur innerhalb von Minuten auf –20 bis –40 °C. In so kurzer Zeit bilden sich nur sehr kleine Eiskristalle, deshalb platzen die Zellen nicht. Abgesehen davon, dass knackig einfach besser schmeckt, lässt eine intakte Zellstruktur auch Bakterien nicht so rasch eindringen.

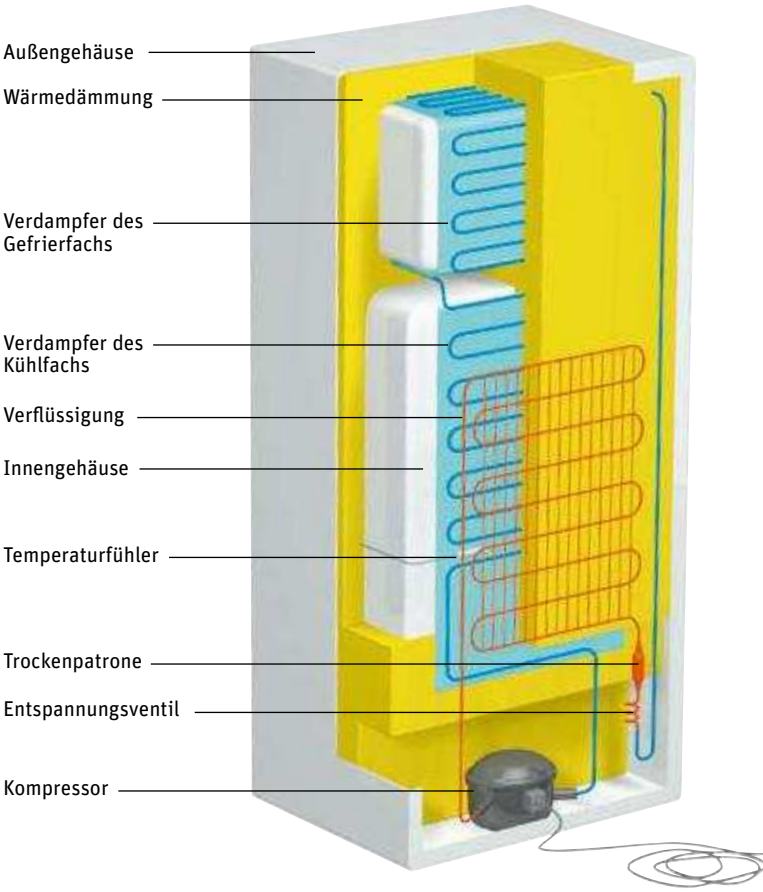
Etwa 20 Prozent des Stromverbrauchs privater Haushalte dient heutzutage der Konservierung von Lebensmitteln im Kühl- oder Gefrierschrank. Die Technik nutzt denselben physikalischen Effekt, der die Temperatur in einem Kochtopf bei 100 °C stabilisiert (den Atmosphärendruck auf Meereshöhe vorausgesetzt). Bei dieser Siedetemperatur geht Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über – es verdampft. Dabei nimmt es Energie mit, da es als Gas beweglicher ist. Dieser Entzug von Wärme durch Verdampfen erfolgt in Kühlschränken und Gefriertruhen bereits ab –30 °C.

Um das Kältemittel zu verdampfen, lässt man es durch ein so genanntes Entspannungsventil strömen. Denn es ist nur bei einem höheren Druck von etwa acht Bar flüssig. Wenn der Druck durch Expansion abfällt, geht es deshalb in den gasförmigen Aggregatzusand über. Außerhalb des Geräts verdichtet ein Kompressor es erneut, das Gas kühlt ab, ein Wärmetauscher gibt die Energie wieder an die Umgebung ab. Somit ist es auch wenig sinnvoll, ein warmes Zimmer durch einen offenen Kühlschrank auf angenehme Temperaturen bringen zu wollen.

Da kalte Luft schwerer ist als warme, können die in Supermärkten üblichen Gefriertruhen oben offen sein, so dass sich der Kunde bequem seine Waren aussuchen kann. Inzwischen jedoch setzen sich mehr und mehr übersichtlichere Kühlregale mit Türen durch, da damit der Wärmeaustausch mit der Umgebung noch geringer gehalten werden kann und somit Energie und Kosten gespart werden.

Bernhard Gerl ist freier Technikpublizist in Mainz.

Kühlschrankrückseite



Wussten Sie schon?

▶ **Der afrikanische Kühltopf:** Der nigerianische Lehrer Mohammed Bah Abba hat eine Technik weiterentwickelt, die schon bei den alten Ägyptern bekannt war: Er stellt zwei Tontöpfe ineinander und füllt den Zwischenraum mit nassem Sand. Das Wasser diffundiert durch den äußeren Tontopf und verdunstet. Dabei transportiert es Wärme ab, so dass der innere, mit einem feuchten Tuch abgedeckte Topf um mehrere Grad gekühlt wird. Fleisch kann darin einige Tage aufbewahrt werden. Bah Abba wurde im Jahr 2000 für seine Erfindung mit dem »Rolex Award« ausgezeichnet.

▶ **Beim Campen** ist Strom für den Kompressor ein rares Gut, Gaskartuschen hingegen gehören zur Grundausstattung jeder Campingküche. Deshalb werden dort so genannte Absorberkühlschränke eingesetzt. Das Kältemittel ist Ammoniak, der verdampft und so Wärme aufnimmt. Es muss zuerst aus einer hochkonzentrierten Ammoniak-Wasser-Lösung ausgetrieben werden, dazu dient ein Gaskocher. Im Absorber geht das Ammoniak wieder in Lösung.

▶ **Beim thermoelektrischen Kühlschrank** nutzt man den so genannten Peltiereffekt, der auftritt, wenn zwei elektrische Leiter mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten in Kontakt kommen – in ihnen haben Elektronen bei gleicher Temperatur verschiedene Bewegungsenergie. Fließt Strom aus dem Material mit Ladungsträgern niedrigerer Energie in den Leiter mit höherenergetischen Elektronen, so geben Letztere durch Stöße ihre Energie ab – es wird lokal kälter. Das nutzen beispielsweise Kühlboxen für Autos. Im Vergleich zum Kompressorkühlschrank wird aber nur ein Viertel der eingesetzten elektrischen Leistung in Kühlung umgesetzt.

▶ **Bis zum Jahr 2000 dienten** bestimmte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) als Kältemittel, also Kohlenwasserstoffmoleküle, in denen Wasserstoffatome durch die Halogene Chlor und Fluor ersetzt wurden. Ihre Vorteile: sehr beständig, nicht entflammbar, geruchlos, weit gehend ungiftig. Doch im Lauf der 1970er und 1980er Jahre erkannten Forscher, dass bei der Produktion und Entsorgung von Kühlschränken in die Luft entwichene FCKWs fatale Wirkung in der Atmosphärenchemie entfalteten und dazu beitrugen, die gegen UV-Strahlung schützende Ozonschicht zu zerstören. Deshalb wurden diese Kältemittel weltweit verboten und durch teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe, fluorierte Kohlenwasserstoffe, Propan, Butan, Pentan, Ammoniak und sogar Kohlendioxid ersetzt – das Treibhausgas eignet sich vor allem für größere Anlagen wie Kühlhäuser, da es ungiftig, nicht entflammbar und als Abfallstoff der Chemieindustrie auch preisgünstig ist.

▶ **Obst und Gemüse** verlieren mit der Zeit Wasser. Damit sie länger frisch und knackig bleiben, werden sie in vielen Supermärkten durch Sprühnebel befeuchtet. Den erzeugt man mittels Trockeneis, das verdampft, sobald man es in Wasser bringt, oder mit Ultraschall-Luftbefeuchtern. Letztere reißen so feine Tröpfchen aus entmineralisiertem, entkeimtem und entkalktem Wasser, dass diese längere Zeit in der Luft schweben. Die relative Luftfeuchtigkeit steigt in unmittelbarer Umgebung der Produkte auf bis zu 95 Prozent, die Luft kann deshalb kaum noch Wasser aufnehmen, Obst und Gemüse bleiben knackig. Obendrein senken Nebeltröpfchen, die sich darauf niederschlagen, durch Verdunsten die Temperatur um bis zu vier Grad Celsius. Und vor allem: Die Produkte wirken frisch und appetitlich.

Wo sollten welche Lebensmittel untergebracht werden? Da Wärme nach oben steigt und manche Bereiche im Schrank nur indirekt gekühlt werden, entstehen Zonen unterschiedlicher Temperatur.

▶ **oben: 8 bis 10 °C, gekochte Speisen und konservierte Lebensmittel wie Marmeladen**

▶ **Mittelbereich: 5 bis 8 °C, geeignet für Milch und Milchprodukte**

▶ **unten: 2 bis 5 °C, für leicht Verderbliches wie Wurst und Fleisch.**

▶ **Schubfächer unterhalb der Kühlschlangen: Bei 8 bis 9 °C halten sich vor allem Obst und Gemüse.**

▶ **Türfächer: 5 bis 10 °C, Butter, Eier, Getränke**

INFEL AG, ZÜRICH; ILLUSTRATOR: CLAUDIO KÖPPEL

 Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

RISKANTER ALS NÖTIG

Nur schwere Fahrzeuge bieten ihren Insassen ausreichend Schutz bei Verkehrsunfällen, lautet die gängige Meinung. Doch Leichtbauweise und konstruktive Veränderungen könnten viele tödliche Unfälle vermeiden helfen. Ganz nebenbei ließe sich auch der Kohlendioxidausstoß reduzieren.

Von Thomas P. Wenzel und Marc H. Ross

Sie erzeugen rund ein Fünftel der Kohlendioxidemissionen der Vereinigten Staaten: die Kraftfahrzeuge auf den amerikanischen Straßen. Doch Kohlendioxid in der Atmosphäre ist Mitverursacher des Klimawandels, gleichzeitig sind Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mitverantwortlich für Amerikas Abhängigkeit von ausländischem Öl. Der Ölpreis wiederum ist in jüngerer Zeit geradezu explodiert. Aus diesen und weiteren Gründen würden (nicht nur) US-Politiker den Treibstoffverbrauch ihres Landes natürlich gerne verringern.

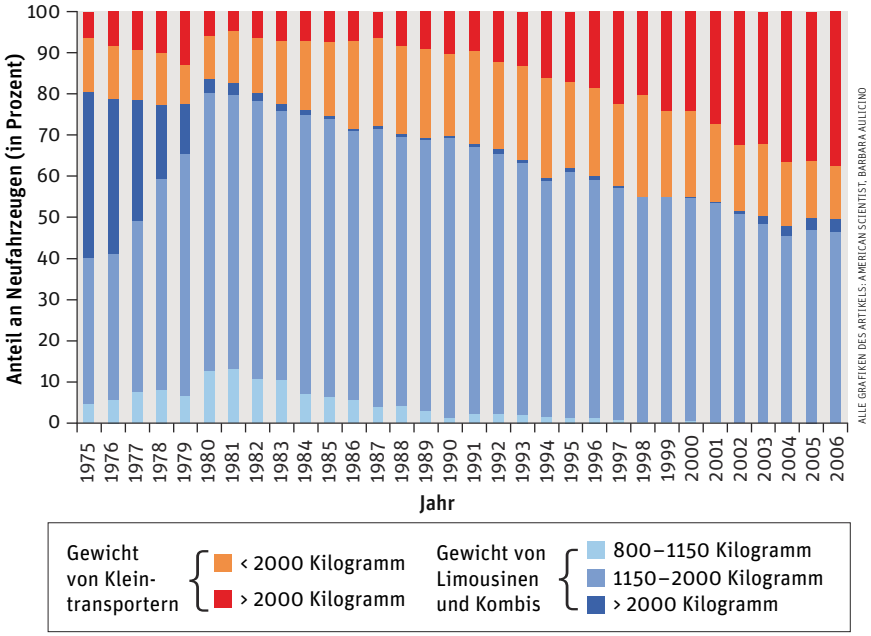
Doch der Verbrauch von US-Neufahrzeugen ist seit den späten 1980er Jahren kaum gesunken. Damals schluckten sie im Mittel rund 8,5 Liter Treibstoff pro 100 Kilometer und erfüllten damit gesetzliche Vorschriften, die noch aus der Mitte der 1970er Jahre stammten. In den vergangenen zwei Jahrzehnten nutzten die Hersteller die Fortschritte in der Automobiltechnologie meist nur, um die Leistung der Fahrzeuge zu steigern. Damit stieg aber auch deren Gewicht. Hinzu kam, dass eine Reihe Sprit fressender Fahrzeugtypen immer populärer wurden: Pick-ups, Sport Utility Vehicles (SUVs) und Minivans. Erstere sind US-typische Kleintransporter mit offener Ladefläche, als SUVs werden Geländewagen und mehr oder weniger geländegängige Pkws bezeichnet, und Minivans schließlich sind im amerikanischen Sprachgebrauch familientaugliche Großraumlimousinen. Vor allem solchen Wagen ist es zu verdanken, dass heutige Fahrzeuge im Durchschnitt genauso viel Treibstoff benötigen wie ihre Vorgänger vor 20 Jahren.

Dem Wunsch nach geringerem Benzinverbrauch steht seit langer Zeit das Argument entgegen, dass die Insassen leichterer Fahrzeuge bei einem Unfall stärker gefährdet seien. Das sei simple Physik, heißt es meist: Sind alle sonstigen Umstände identisch, werden leichtere Fahrzeuge bei einem Frontalzusammenstoß stärker abgebremst – dies kann für die Insassen gefährlich werden. Von genau diesem Argument lassen sich Entscheider in den Behörden und in der Politik ebenso wie ein großer Teil der Öffentlichkeit noch heute beeinflussen.

Während einige Forschungsarbeiten ihre Position stützen, gibt es aber auch Studien, die ihr widersprechen. In den letzten Jahren haben wir beide Seiten unter die Lupe ge-

AMERIKANISCHE SCHWERGEWICHTE

Um US-Vorschriften zum Benzinverbrauch zu erfüllen, die in den 1970er Jahren erlassen wurden, verkauften die dortigen Hersteller zunächst immer weniger schwere Fahrzeuge mit mehr als zwei Tonnen Gewicht (dunkelblau). 1980 waren diese Modelle aus den Verkaufsräumen fast verschwunden. Doch nachlassende Sorgen über Benzinpreise und gelockerte Verbrauchsvorschriften ließen die Zahlen von Pick-ups und Geländefahrzeugen in der Gewichtsklasse ab zwei Tonnen bald wieder wachsen (rot). 2006 machten sie fast 40 Prozent der Neuwagen aus. (Das Kraftfahrt-Bundesamt erstellt keine Statistiken nach dem Leergewicht.)



CAPE COD TODAY, JAKE O'CALLAGHAN

Auch wenn sich die Fahrer von Pick-ups und SUVs inmitten von zwei Tonnen Stahl sehr sicher fühlen mögen, sprechen Unfallstatistiken eine andere Sprache: Das Risiko, bei einem Unfall ums Leben zu kommen, ist bei diesen Fahrzeugen wegen ihrer hohen Überschlagsneigung genauso groß wie bei normalen Limousinen.

nommen und überdies eigene Untersuchungen angestellt. Dabei kamen wir zu folgendem Schluss: Die Behauptung, leichtere Fahrzeuge seien für die Insassen gefährlicher, steht auf recht wackeligen Beinen. Denn man kann eben nicht davon ausgehen, dass bei unterschiedlichem Gewicht alle sonstigen (Unfall-) Umstände stets identisch sind. Wie die Daten zur Sicherheit der verschiedenen Fahrzeugtypen zeigen, bestimmen offenbar andere Faktoren des Fahrzeugdesigns, was bei einem Zusammenstoß wirklich passiert.

Viel wichtiger ist jedoch folgende Erkenntnis: Dank hochfestem Stahl, Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium und faserverstärkten Kunststoffen können wir mittlerweile Fahrzeuge entwerfen, die erstens leichter und zweitens sicherer sind als ihre Vorgänger. Und solche Autos verbrauchen natürlich auch weniger Benzin.

Reduziert man das Gewicht eines Autos um zehn Prozent, geht sein Verbrauch um drei bis acht Prozent zurück. Acht Prozent lassen sich dann erreichen, wenn gleichzeitig die Motorleistung so reduziert wird, dass das Fahrzeug noch dasselbe Beschleunigungsverhalten aufweist. Den Konstrukteuren ist dieser Zusammenhang natürlich sehr bewusst. Als zum ersten Mal Vorschriften für den Benzinverbrauch erlassen wurden, sonderten die US-Hersteller fast alle Fahrzeuge mit über 1,8 Tonnen Leergewicht aus ihren Neuwagenflotten aus. Dadurch sank der Anteil der Straßengiganten an den Gesamtverkäufen von 40 Prozent im Jahr 1975 binnen fünf Jahren auf nur noch drei Prozent. Ab den späten 1980er Jahren aber wuchsen die Verkaufszahlen von *light trucks* allmählich wieder. Diese Fahrzeuge, deren Spektrum von der Großraumlimousine bis zum Kleintransporter reicht, sind für Nutzlasten bis zu 1,8 Tonnen zugelassen. Zu ihnen zählen aber auch viele der SUVs, die mittlerweile statt der üblichen Familienlimousinen in den Garagen stehen. Bis 2002 stieg der Anteil der *light trucks* mit mehr als zwei Tonnen Gewicht auf US-amerikanischen Straßen wieder auf 32 Prozent.

Trügerisches Gefühl von Sicherheit

Viele schätzen den Eindruck von Sicherheit und Schutz, den diese Ungetüme vermitteln, und das hohe Gewicht trägt tatsächlich zur Sicherheit bei. Doch bei schweren Unfällen ist dieser Einflussfaktor kaum von Belang, wenn man ihn mit den drei Hauptursachen für Unfälle mit Todesfolge oder schweren Verletzungen vergleicht. Die nämlich bestehen darin, dass ein anderes Fahrzeug oder ein Objekt am Straßenrand in die Fahrgastzelle eindringt, dass es zu Überschlägen kommt oder dass Sicherheitsvorrichtungen versagen, die Insassen vor dem Kontakt mit harten Bauteilen im Fahrzeuginneren schützen sollen.

Ob ein Objekt in die Fahrgastzelle eindringen kann oder nicht, hängt entscheidend von

In Kürze

- Den **Treibstoffverbrauch im Straßenverkehr zu senken** wird immer wichtiger. Doch weiterhin gilt im Fahrzeugbau die Devise: Schwere Autos sind sicherer.
- Die **Hauptursachen tödlicher Unfälle** sind jedoch Überschläge, das Eindringen von Gegenständen in die Fahrerkabine und das Versagen von Sicherheitsvorrichtungen. Der Zusammenhang zwischen Gewicht und Sicherheit besteht nur sehr eingeschränkt.
- Leichtbauweise und verändertes Fahrzeugdesign könnten **viele Unfallfolgen verringern** helfen.

deren Widerstandsfähigkeit sowie der Höhe und Steifigkeit des Kollisionspartners ab. Daher können die Autobauer die Zahl der Unfallopfer bei Zusammenstößen senken, indem sie Waben-Sandwich-Strukturen oder faserverstärkte Materialien einsetzen. Damit erreichen sie höhere Festigkeit, ohne die Masse erhöhen zu müssen. Auch auf kompatibles Design müssen sie verstärkt achten, so dass Fahrzeuge bei Unfällen ihre jeweilige Bewegungsenergie optimal aufnehmen, ohne die Insassen zu gefährden.

Die beste Strategie gegen Überschläge ist ein tiefer Fahrzeugschwerpunkt und eine große Spurweite. Auch elektronische Stabilitätsprogramme (ESP) können hilfreich sein, indem sie vollautomatisch und gezielt eines oder mehrere der vier Wagenräder abbremsen (siehe »Elektronische Schutzengel«, Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 74). Kommt es trotzdem zum Überschlag, bestimmt normalerweise die Stabilität des Dachs, ob sich angeschnallte Insassen verletzen.

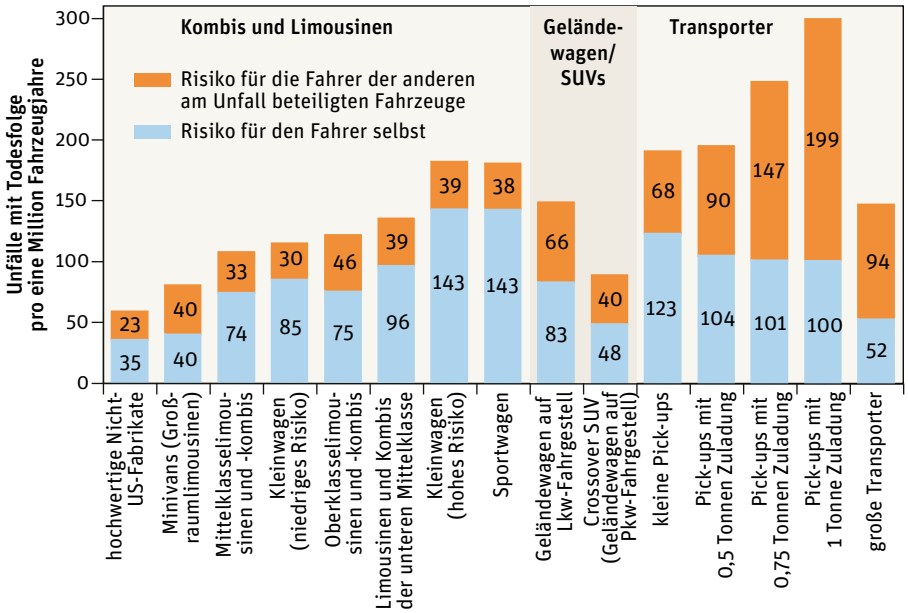
Wie bei allen Unfällen bieten auch Sicherheitssysteme wie Gurte und Airbags einen wichtigen Schutz bei Überschlägen. Immer mehr Autos verfügen über Fensterairbags, die verhindern, dass der Kopf gegen die Seitenfenster schlagen kann, und über Sicherheitsgurte mit Vorspanneinrichtungen und Gurtkraftbegrenzern. Derzeit werden auch Vierpunktgurte weiter untersucht. Sie sollen Fahrzeuginsassen bei einem Seitenaufprall besser in ihrer Position halten als die üblichen Dreipunktgurte für Becken und Schultern. Solche Systeme werden zwar vor allem in schwerere und teurere Fahrzeuge eingebaut, erhöhen das Gewicht des Fahrzeugs – wenn sich die Hersteller denn darum bemühen – aber nur leicht.

Verringerte man das Gewicht aller Fahrzeuge auf den Straßen gleichzeitig, würde dies die gegenwärtige Sicherheitssituation nicht beeinträchtigen: zum einen, weil sich das relative Gewicht der Fahrzeuge nicht ändern würde, zum anderen aber auch deshalb, weil ein Großteil der Verletzungen bei Unfällen in keinem Zusammenhang mit dem Gewicht der beteiligten Fahrzeuge steht.

Von welchen Faktoren hängt nun die Sicherheit im Straßenverkehr ab? Für die Frage, ob es zu schweren Unfällen kommt, sind das Verhalten der Fahrer und äußere Einflüsse ebenso wichtig wie die Geschwindigkeit, mit der Fahrzeuge aufeinanderprallen. Art und Ausmaß der Verletzungen wiederum werden entscheidend davon beeinflusst, ob die Sicherheitsgurte angelegt wurden. Alter und physische Konstitution der Menschen spielen ebenfalls eine Rolle. Fragen wir hingegen, wie sich eine ganz bestimmte Unfallsituation auswirkt, kommt der Fahrzeugkonstruktion der größte Einfluss zu.

Sicher unterwegs? Das hängt vom Fahrzeug ab

Gefährlich ist das Autofahren immer. Wie gefährlich, hängt aber zu einem großen Teil davon ab, in welchem Fahrzeug man unterwegs ist. Große US-Pick-ups zum Beispiel sind mit einer fast sechsmal höheren Wahrscheinlichkeit als hochwertige, in die USA importierte Fabrikate an einem tödlichen Unfall beteiligt. Die Opfer sind seltener die Fahrer der Pick-ups selbst, sondern die Insassen der anderen am Unfall beteiligten Fahrzeuge. Das Risiko tödlicher Unfälle wird aber auch vom Fahrerverhalten beeinflusst. Dies könnte erklären, warum sich Minivans als viel sicherer als Sportwagen erweisen. (Abweichungen unter zehn Prozent sind statistisch nicht von Bedeutung.)



Studien mit begrenztem Wert

Totalschäden sind zwar selten, gleichwohl machen sich viele Neuwagenkäufer Gedanken über diesen Fall und informieren sich über Sicherheitsausstattung und Crashtestergebnisse. In den USA ist es eine Regierungsbehörde namens National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), die regelmäßig Crashtests durchführt und die Fahrzeugmodelle entsprechend einstuft. Auch ein von US-Autoversicherern getragenes Forschungsinstitut, das Insurance Institute for Highway Safety (IIHS), testet Fahrzeuge auf ihr Unfallverhalten und veröffentlicht die Ergebnisse. In Deutschland ist es vor allem der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC), der regelmäßig umfassende Crash- und Sicherheitstests organisiert und das nach Körperteilen aufgeschlüsselte Verletzungsrisiko ermittelt.

So wichtig diese Studien auch sind, besitzen sie doch nur begrenzten Wert. Denn kein Versuchsaufbau wird je alle Umstände berück-

Schauen Sie mal: 55 Interviews **ohne Worte.**

Ihr todsicheres Frauenaufreißer-Gesicht?

Wie betrachtet man die Mona Lisa, wenn man nicht als Kunstbanause gelten will?

Wie schaut der Franzose, denkt er an die Deutschen?

„Sagen Sie jetzt nichts“: Die 55 besten stummen Interviews in einem hochwertigen Bildband. Mit unveröffentlichtem Material und einem Blick hinter die Kulissen. Unter anderem mit Iris Berben, Mario Adorf, Ulrich Wickert, Oliver Kahn, Anke Engelke und Rudi Carrell. Präsentiert auf 128 Seiten vom Süddeutsche Zeitung Magazin. **Jetzt für nur 24,90 Euro im Handel oder unter www.sz-shop.de.**

Seien Sie anspruchsvoll.

Süddeutsche Zeitung

ABGESTRAFT

Ende 2007 veröffentlichte die US-Regierungsbehörde NHTSA Daten über die Höhe der Strafen, die auf dem US-Markt tätige Autohersteller im vergangenen Jahr für das Überschreiten des Treibstoffverbrauchs ihrer SUV- und Pkw-Flotten zahlen mussten. Beim Baujahr 2006 blieben die Deutschen – neben Ferrari und Maserati, die mit je rund einer Million Dollar zur Kasse gebeten wurden – praktisch unter sich: Volkswagen (ca. 1 Mio.), BMW, Porsche (je 5 Mio.) und DaimlerChrysler (mittlerweile wieder Daimler). Die Stuttgarter Edelmarke zahlte die bisherige Rekordstrafe von 30 Millionen Dollar.

sichtigen können, die eine Rolle spielen, wenn auf der Straße tatsächlich etwas schiefgeht. Um diesem erheblichen Defizit zu begegnen, haben wir und andere Wissenschaftler einen ganzen Berg an Daten zu tatsächlichen Unfällen analysiert. Damit wollten wir herausfinden, wie sehr Fahrerverhalten und äußere Einflüsse einerseits sowie Sicherheitsausstattung und Fahrzeugdesign andererseits die Folgen eines Unfalls beeinflussen.

Größere Gefahr für den Unfallgegner

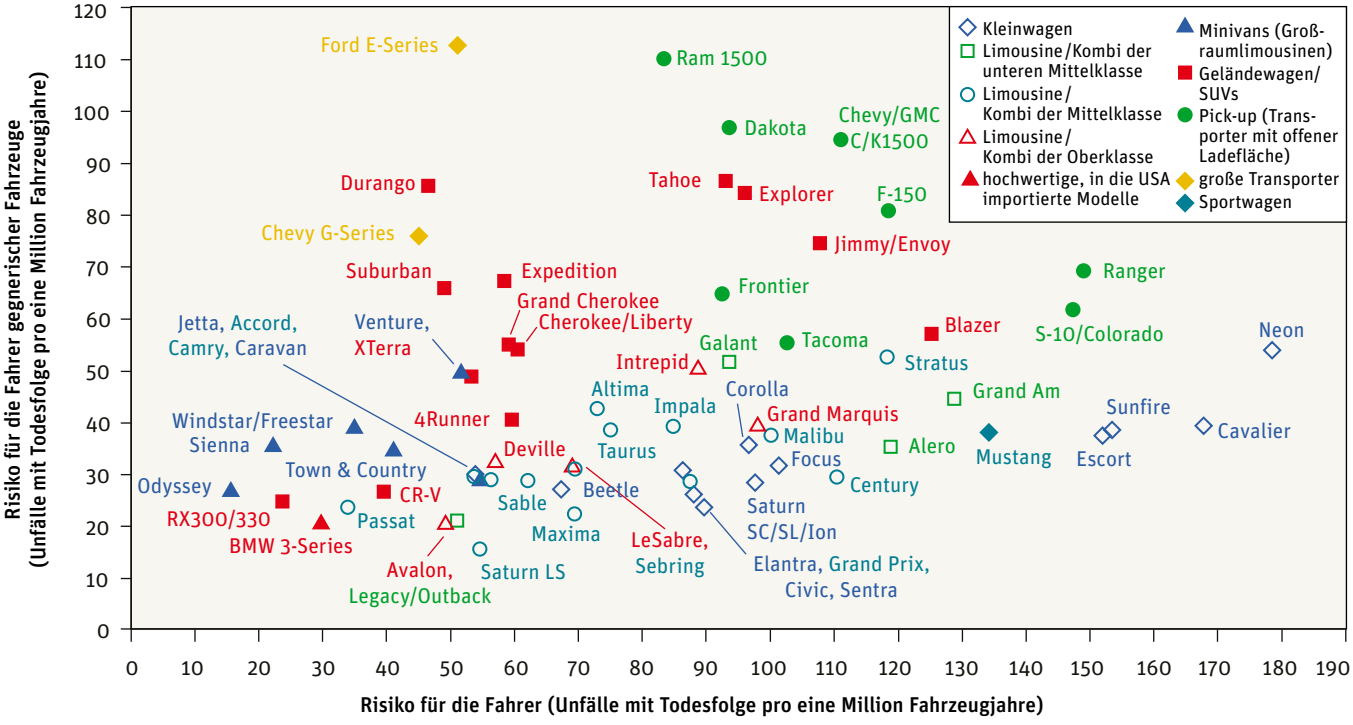
Der Maßstab, den wir (und auch Forscher etwa am IIHS) zu diesem Zweck anlegen, ist die Rate der tödlichen oder mit schweren Verletzungen einhergehenden Unfälle mit verschiedenen Fahrzeugtypen, Marken und Modellen. Es ist bei dieser Art von Untersuchungen allerdings schwierig, oft sogar unmöglich zu entscheiden, welchen Einfluss die einzelnen Faktoren besaßen.

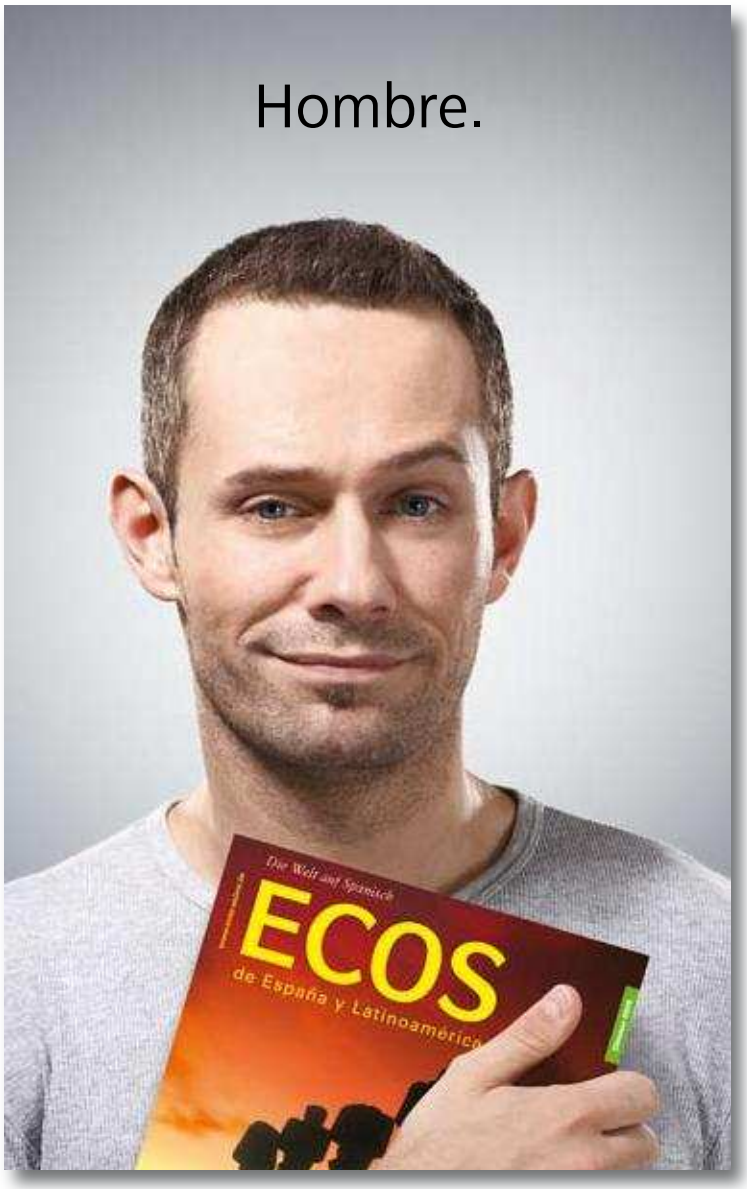
Für unsere Studien berechneten wir das Risiko, dass ein Verkehrsteilnehmer bei einem Unfall ums Leben kommt, aus einer von den US-Bundesstaaten geführten Datenbank namens FARS (Fatality Analysis Reporting System). Sie enthält Daten aller Unfälle mit tödlichem Ausgang auf öffentlichen Straßen. Das Risiko eines tödlichen Unfalls ermitteln wir, indem wir die Zahl der Unfalltoten im Verlauf eines Jahres durch die Zahl der in diesem Jahr zugelassenen Fahrzeuge teilen. Tatsächlich war unser Vorgehen ein wenig komplizierter, denn meist analysierten wir Zeiträume von mehreren Jahren. Es war aber schlicht zu teuer, all die Daten zu besorgen, aus denen die Zahl der zugelassenen Fahrzeuge für die gesamten Zeiträume hervorgegangen wäre. Deshalb schätzten wir die Gesamtzahl der jeweils zugelassenen Fahrzeuge auf Basis unserer unvollständigen Datensätze. Nun konnten wir recht einfach das Risiko berechnen, dass es mit einem bestimmten Fahrzeugtyp, einer bestimmten Automarke oder einem einzelnen Modell zu einem tödlichen Unfall kommt.

Zusätzlich wollten wir aber auch herausfinden, welche Gefahr bestimmte Fahrzeuge für andere Fahrer darstellen. Nur so lässt sich das gesamte Risiko ermitteln, das die Gesellschaft

WELCHE AMERIKANISCHEN AUTOMODELLE BERGEN DIE GRÖSSTEN RISIKEN?

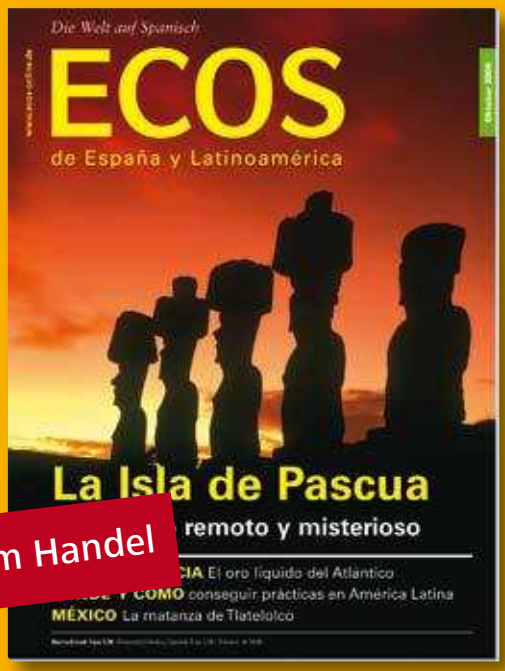
Mit Hilfe einer US-weiten Datenbank, die alle tödlichen Unfälle auf öffentlichen Straßen erfasst, ermittelten die Autoren das Risiko, bei einem Unfall ums Leben zu kommen, in Abhängigkeit von bestimmten Automarken und Modellen. Die waagerechte Achse gibt das Risiko an, dem Fahrer eines bestimmten Wagens ausgesetzt sind, während die senkrechte Achse dasjenige für die Fahrer von Fahrzeugen angibt, die mit diesem Wagen kollidieren. Pick-ups mit einer halben oder eine Tonne Nutzlast sind nicht dargestellt, stellen für Unfallgegner aber ein beträchtlich höheres Risiko als die anderen hier gezeigten Modelle dar. (Unterschiede kleiner als 20 Prozent sind statistisch nicht von Bedeutung.)





Die spanischen Seiten des Lebens.

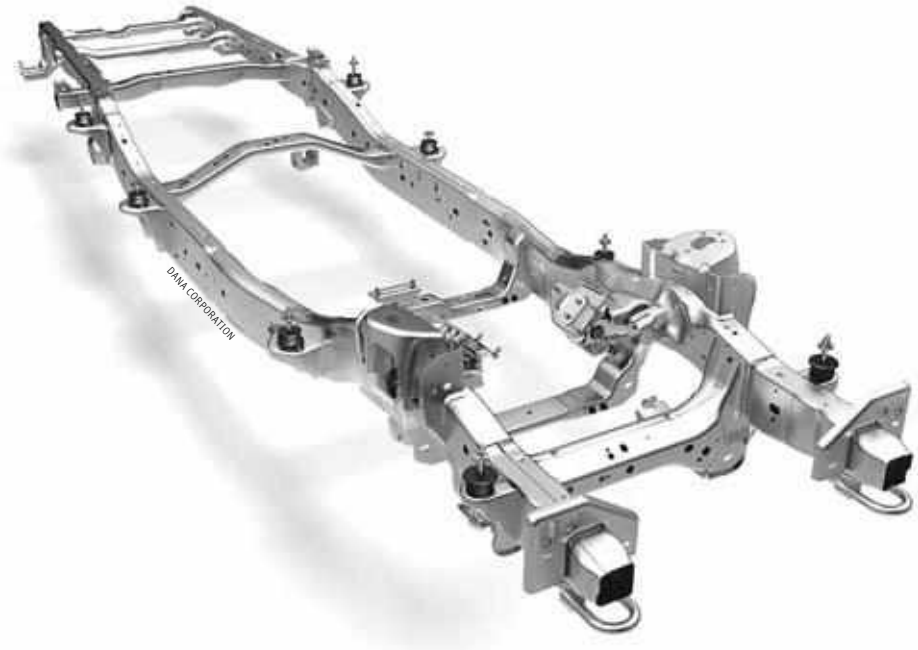
+ ECOS macht den Unterschied. Aktuelle Reportagen und umfassende Berichte über Kunst, Kultur, Land und Leute machen Sie schnell fit für die spanische Sprache.
+ Erweitern Sie ganz nebenbei Ihren Wortschatz für Freizeit, Urlaub oder Beruf und kommen Sie mit Menschen in aller Welt ins Gespräch.
+ Holen Sie sich jetzt die neue Ausgabe im Zeitschriftenhandel oder lassen Sie sich die Hefte bequem nach Hause liefern.



Jetzt im Handel

www.ecos-online.de/info

brand.david



Anders als die meisten Limousinen bauen Pick-ups und Geländewagen oft auf Lkw-Fahrgestellen auf. Diese bestehen im Wesentlichen aus zwei langen Stahlträgern, die sich bei Unfällen mit anderen Fahrzeugen als sehr »aggressiv« erweisen. Das Bild zeigt das Fahrgestell des Pick-ups F-150 von Ford.

GEWICHTIGE UNTERSCHIEDE?

Im deutschen Unfallgeschehen spielt die Kompatibilität, zumindest laut einer Studie aus dem Jahr 2006, eine geringere Rolle als in den USA. Ihre Autoren Heiko Bürkle und Jörg Bakker betrachteten vor allem den Zusammenprall »von groß und klein«. Nur 0,4 Prozent der untersuchten Unfälle mit schwer oder tödlich Verletzten standen mit einem Gewichtsunterschied von über 500 Kilogramm in Zusammenhang. Allerdings entfallen in den USA bis zu 50 Prozent der Zulassungen auf SUVs. Deutsche SUVs, die eher kleiner und niedriger sind als ihre US-Pendants, kommen auf nur knapp über sieben Prozent.

Doch der Begriff der Kompatibilität lässt sich auch >>>

auf sich nimmt, wenn sie bestimmte Fahrzeuge gegenüber anderen bevorzugt. Verkehrsforscher sprechen üblicherweise nur über die Gefahren für die Insassen eines bestimmten Fahrzeugs, vernachlässigen aber die Folgen für die Unfallgegner – als ob sie für die Gesellschaft nicht von Belang wären, solange nur die Insassen im betrachteten Wagen nicht zu Tode kommen.

Weil wir Statistiken tatsächlicher Unfälle nutzten, spiegeln die von uns berechneten Werte verschiedene Einflussfaktoren wider. Hierzu gehören das Risiko, überhaupt in einen Unfall verwickelt zu werden, und die tatsächliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge – beides vor allem eine Frage äußerer Faktoren und des Fahrerverhaltens. Weitere Risikofaktoren sind die (Nicht-)Verwendung der Sicherheitsgurte, das Fahrzeugdesign und die physische Konstitution des Fahrers. Der Begriff »Risiko«, wie wir ihn hier verwenden, bemisst also das unter den jeweiligen Rahmenbedingungen tatsächlich gegebene Risiko.

Zu unseren wichtigsten Ergebnissen zählt, dass Fahrer in gewöhnlichen Limousinen (zu denen wir im Folgenden der Einfachkeit halber auch Kombifahrzeuge zählen wollen) genauso sicher sind wie in Geländewagen oder Pick-ups. Denn obwohl die Gefahr geringer ist, in einem SUV oder einem kleinen Transporter durch einen Zusammenstoß ums Leben zu kommen, bringt der hohe Schwerpunkt dieser Fahrzeuge mit sich, dass sie sich leichter überschlagen. Dieses Risiko hat mittlerweile allerdings deutlich abgenommen, denn glücklicherweise produzieren die Hersteller zunehmend so genannte Crossover-SUVs. Diese sind von vornherein für die Nutzung auf Straßen ausgelegt und basieren anders als ihre Vorgänger nicht mehr auf Lkw-Fahrgestellen, sondern sind niedriger und verfügen manchmal auch über einen breiteren Radstand.

Oberklasse-Limousinen sind kaum weniger »riskant« als Modelle der Mittelklasse und unteren Mittelklasse und besitzen auch den sichereren Exemplare unter den Kleinwagen gegenüber keinen wesentlichen Vorteil. Die Unterschiede, die wir fanden, bewegen sich alle innerhalb der statistischen Schwankungsbreite. Wirklich überrascht hat uns aber, dass wir verschiedene Kleinwagenmodelle in höchst unterschiedliche Kategorien einstufen mussten: In den »gefährlichsten« von ihnen ist das Risiko der Insassen, darin ums Leben zu kommen, dreimal höher als in den sichersten.

Für ein gegebenes Risiko finden sich problemlos Beispiele in fast allen Fahrzeugklassen: Mittelklasse, Oberklasse und SUVs. Für die Fahrer und Insassen der Kollisionsgegner hingegen sind SUVs und Pick-ups viel gefährlicher als Limousinen oder Minivans. Der Grund dafür ist klar. Die meisten SUVs sind im Wesentlichen limousinenähnliche Fahrgastzellen, die auf ein kleines Lastwagengestell montiert wurden. Dieses wiederum besteht aus einem Leiterrahmen mit zwei langen Stahlträgern, die wie Speere in ein anderes Auto eindringen können. Bei Frontalzusammenstößen bohren sie sich oft durch die Stoßstange, bei einem seitlichen Crash durch die Türen.

Pick-ups erschreckend aggressiv

Durch ihre hohen, unnachgiebigen Strukturen sind Pick-ups und SUVs grundsätzlich inkompatibel mit dem Design gewöhnlicher Pkws, wenn es um die bestmögliche Reduzierung von Unfallfolgen geht. Forscher auf dem Gebiet der Fahrzeugsicherheit sprechen daher von einer »aggressiven« Fahrzeugkonstruktion. Sie empfehlen, die Fronten der Transporter niedriger und nachgiebiger zu gestalten und gleichzeitig die Türschwellen normaler Autos zu erhöhen, um das Eindringen von Stoßstangen und Rahmenelementen zu erschweren. Tatsächlich belegten unsere Analysen von Crossover-SUVs mit niedrigeren Fronten und ohne steife Leiterrahmen, dass von solchen Designs, verglichen mit SUVs auf Lkw-Chassis, eine geringere Gefahr ausgeht. Gleichzeitig brauchen sie bei identischer Größe des Innenraums etwa zehn Prozent weniger Benzin.

Dass die Aggressivität von Pick-ups mit steigender maximaler Nutzlast zunimmt, hatten wir erwartet. Die größten Pick-ups sind für andere Fahrzeuge sogar fast sechsmal so gefährlich wie ein Durchschnittsauto. Die Sta-

tistik ist geradezu erschreckend: Die Wahrscheinlichkeit, dass durch einen Pick-up mit einer Tonne Nutzlast – solche Autos werden durchschnittlich 14 Jahre lang gefahren – ein Mensch ums Leben kommt, beträgt fast ein Prozent. Und nur ein Drittel dieses Risikos entfällt auf den Fahrer des Transporters.

Einige unserer weiteren Ergebnisse haben jedoch weniger mit Größe, Gewicht oder Design des Wagens zu tun, sondern vielmehr mit der Frage, welche Art von Fahrern üblicherweise in bestimmten Fahrzeugen sitzt. Wir verfügen über Daten zu Alter und Geschlecht sowie zu illegalem Fahrverhalten, darunter das Fahren unter Alkohol und Drogen, Fahren ohne Führerschein, rücksichtsloses Fahren bei Unfällen und Verkehrsvergehen des Fahrers während der vorangegangenen drei Jahre. Zwar müssen wir im Folgenden eher Andeutungen machen, als dass wir konkrete Beweise vorlegen könnten. Gleichwohl sind die beobachtbaren Muster aufschlussreich und kommen als Erklärung dafür in Frage, warum manche Fahrzeuge so viel gefährlicher erscheinen als andere.

Für die Person hinter dem Steuer sind Minivans die sichersten Fahrzeuge, Sportautos die gefährlichsten. Nur vier Prozent der Unfälle, bei denen der Fahrer einer Großraumlimousine zu Tode kommt, betreffen Männer unter 26 Jahren; bei Sportautos beträgt dieser Wert 39 Prozent. Hier spielen wohl also vor allem Unterschiede im Fahrverhalten die entscheidende Rolle: In Minivans werden eben oft Kinder transportiert, wer hingegen im Sportauto durch die Gegend fährt, schneidet eher einmal eine Kurve.

Auch hochwertige, in die USA importierte Modelle etwa der BMW-3er-Reihe können als ungefährliche Autos gelten. Die Gründe dafür sind allerdings weniger offensichtlich. Typischerweise verfügen solche Wagen über Sicherheitsausstattung wie Seitenairbags und ESP. Unter den insgesamt relativ wenigen Unfall-

››› weiter fassen. Schließlich können selbst Zusammenstöße identischer Fahrzeuge katastrophal enden. Es genügt unter Umständen schon, wenn eines von ihnen abbremst und dadurch beim Aufprall tiefer liegt. Angesichts des erklärten Ziels der Europäischen Union (EU-25), die Zahl der Verkehrstoten in diesem Jahrzehnt auf jährlich 25 000 zu halbieren, gelten viele Forschungsanstrengungen derzeit Maßnahmen, die »strukturelle Interaktion« von Fahrzeugen, die Steifigkeit der Fahrgastzelle und die Aufnahme der jeweils eigenen Bewegungsenergie durch die Unfallfahrzeuge zu optimieren.

SCHÜTZENDE LEICHTGEWICHTE

Angeblich leidet die Sicherheit, wenn die Senkung des Treibstoffverbrauchs mit einer Gewichtsreduzierung erkauft wird. Doch Formel-1-Rennwagen (siehe Foto) beweisen, dass auch leichte Fahrzeuge hochstabil sein können. Dank Hightech-Kompositmaterialien besitzen sie meist kaum mehr als das erlaubte Mindestgewicht von 605 Kilogramm (ab 2008 nur 500 Kilogramm). Als beim Grand Prix von Kanada 2007 ein Fahrer mit 280 Kilometer pro Stunde gegen eine Barriere prallte und sich überschlug, erlitt er nur eine Gehirnerschütterung und verstauchte sich den Knöchel.

CACHOU34 / FOTOLIA

www.fischerverlage.de

»Reichholf deckt immer wieder überraschende Zusammenhänge auf.«
Klaus Jacob, Bild der Wissenschaft

Am Anfang war das Bier

Warum gaben die Menschen das Jagen und Sammeln auf? Warum wurden sie sesshaft und begannen mit dem mühseligen Ackerbau? Das Land musste gerodet und Äcker bestellt werden. Man wurde vom Klima abhängig. Josef H. Reichholf geht diesem alles verändernden Schritt in der Kulturgeschichte auf den Grund und findet neue, spektakuläre Antworten.

320 Seiten, gebunden, € (D) 19,90; sFr. 34,90 (UVP)

Ein Buch von S. FISCHER

KLEIN WIRD FEIN

▶ **Der hohe Ölpreis** lässt die Verkaufszahlen von Sprit fressenden Neufahrzeugen einbrechen. Dies spüren unter anderem die großen drei der US-Fahrzeugbranche: Ford, Chrysler und GM kämpfen mit Umsatzverlusten und forderten im August sogar Staatshilfen.

▶ Auch in Deutschland sind **die Kleinen die Gewinner** des Preisanstiegs: Der Smart erreichte bei den Zulassungszahlen, die das Kraftfahrt-Bundesamt für das erste Halbjahr 2008 ermittelte, sogar ein Plus von 43 Prozent. Im Durchschnitt legte das Minisegment kleiner, sparsamer Autos, zu denen etwa auch der Twingo gehört, um knapp 27 Prozent zu.

▶ **Wer trotzdem keinen Kleinwagen will**, spart auf andere Weise. Laut einer Dekra-Umfrage in diesem Jahr achten die Deutschen beim Autokauf mittlerweile weniger auf Sicherheitsausstattung wie elektronische Stabilitätsprogramme (ESP).

SICHERER IN EUROPA

Die Zahl der Verkehrstoten in Europa könnte um jährlich 5000 gesenkt werden, glaubt die Europäische Kommission. Sie schlägt vor, alle Pkws mit elektronischem Stabilitätsprogramm und Bremsassistenten auszustatten. Nutzfahrzeuge sollen vorausschauende Notbremssysteme und Spurhalteassistenten erhalten. Für geringeren Treibstoffverbrauch sollen unterdessen rollwiderstandsarme Reifen sowie Reifendrucküberwachungssysteme sorgen. Eine entsprechende Verordnung könnte diese Ausstattungsmerkmale nach und nach, beginnend ab 2012, verbindlich machen.

opfern sind aber überraschenderweise recht viele junge Männer (21 Prozent). Falls wir annehmen können, dass diese Zahl tatsächlich den Bruchteil hochwertiger ausländischer Fabrikate wiederspiegelt, der von jungen Männern gefahren wird, ließe sich daraus schließen, dass die Sicherheitsausstattung und das Fahrzeugdesign die risikobereite Natur vieler ihrer Fahrer aufwiegt.

Kleinere Autos liefern weitere Belege für dieses Phänomen. Die riskanteren Kleinwagenmodelle scheinen kaum häufiger von jungen Männern gefahren zu werden (23 Prozent) als die weniger gefährlichen (21 Prozent). Daraus lässt sich möglicherweise folgern, dass die sich stark unterscheidende Rate von Unfalltoten bei verschiedenen Kleinwagenmodellen nicht von den jeweiligen Fahrern abhängt. In diesem Fall ist es vermutlich tatsächlich das Design der Autos, das die Menschen am Steuer so stark gefährdet.

Wir stellten auch fest, dass Fahrer von Geländewagen und Pick-ups, die bei einem Unfall starben, sich hinsichtlich Alter, Geschlecht und Vorgeschichte nur in wenigen Fällen von Unfallfahrern in den anderen Autotypen unterscheiden. Dafür, dass sich solche Autos relativ häufig überschlagen und andere Fahrzeuge stärker gefährden, ist daher wahrscheinlich nicht das Fahrerverhalten verantwortlich.

Können wir das höhere Gefahrenpotenzial von Pick-ups also ausschließlich ihrer Konstruktionsweise zuschreiben? Eher nicht. Denn Pick-ups werden häufiger als Limousinen und SUVs auf Landstraßen gefahren. Solche Straßen sind aus mehreren Gründen besonders gefährlich: Sie sind oft auf geringere Geschwindigkeiten ausgelegt, doch Geschwindigkeitskontrollen gibt es kaum. Mittel- und Seitenleitplanken fehlen oft, ebenso wie Randstreifen und Bankette. Außerdem sind Landstraßen schlechter ausgeleuchtet, Unfallkrankenhäuser oft weit entfernt und so weiter.

Um herauszufinden, ob diese Umstände wirklich eine Rolle spielen, ergänzten wir unsere Daten um die Bevölkerungsdichte der jeweiligen Region, in der ein Unfall stattfand. Wie erwartet, geschehen tödliche Unfälle mit Pick-ups – verglichen mit Geländewagen und Limousinen – in ländlichen Gegenden im Durchschnitt viel häufiger. Am Beispiel Kalifornien zeigten wir, dass die Todesrate über alle Fahrzeugtypen hinweg sowohl für die Fahrer selbst auch für die Fahrer der anderen am Unfall beteiligten Fahrzeuge jeweils dort höher ist, wo die Bevölkerungsdichte niedrig ist. Ein Teil des höheren Risikos, das Pick-ups mit sich bringen, ist also nicht ihrer Konstruktionsweise anzulasten, sondern der Tatsache, dass sie die meiste Zeit auf den gefährlicheren Landstraßen unterwegs sind.

GEWICHT ODER HERSTELLER:

Der oft vermutete Zusammenhang zwischen Sicherheit und Gewicht (links) steht auf wackligen argumentativen Beinen. Tatsächlich ist das mit einem Fahrzeug einhergehende Risiko stark vom jeweiligen Hersteller abhängig. Produkte japanischer und deutscher Unternehmen (blau) haben sich als weit sicherer erwiesen als die der US-Konzerne General Motors, Ford und Chrysler (grün). Der Zusammenhang zwischen dem Risiko und dem Wiederverkaufswert nach fünf Jahren ist hingegen sehr eng: Die teureren Fahrzeuge sind auch die sichersten (rechts).

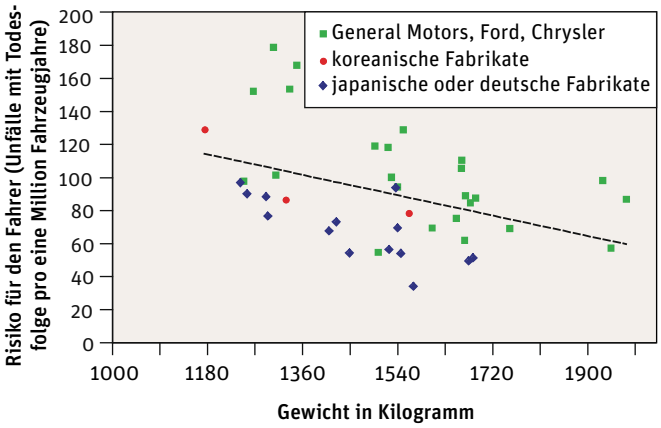
Schließlich gingen wir noch einen Schritt weiter. Wir berechneten die Gefahren, die von bestimmten Automarken und Modellen ausgehen, und kamen zu einigen sehr bemerkenswerten Ergebnissen. Zum Beispiel wird der sicherste Kleinwagen, der VW Jetta, scheinbar sehr oft von den risikobereitesten Fahrern gesteuert. 32 Prozent davon sind junge Männer mit wenig Fahrerfahrung. Ein weiteres aufschlussreiches Beispiel ist der Hyundai Elantra, der seit 2001 serienmäßig Seitenairbags erhält. Nach dem Redesign sank das Risiko für die Elantra-Fahrer um 30 Prozent, auch die Einstufung nach Crashtests mit Frontalzusammenstößen verbesserte sich von drei auf fünf Sterne. Ähnlich der Ford Focus als Nachfolger des Ford Escort: Der Modellwechsel senkte das Risiko um 40 Prozent.

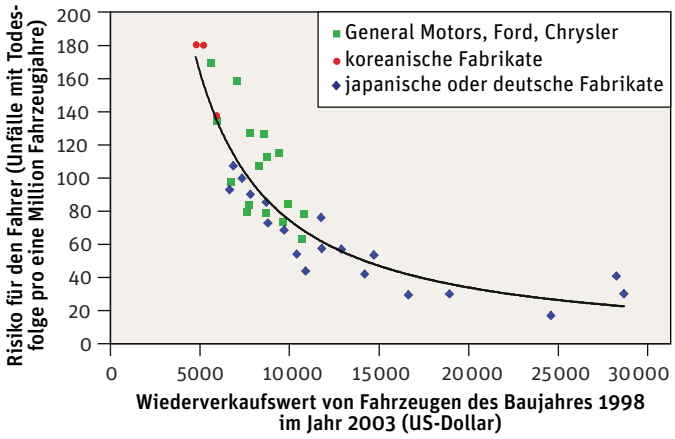
Der Durchschnittsfahrer dieser Modelle dürfte in diesem Zeitraum jedoch der gleiche geblieben sein. Die höhere Sicherheit dürfte also tatsächlich konstruktiven Maßnahmen zu verdanken sein.

Kleiner und leichter – und genauso sicher

Wie aber hängt nun das Risiko, bei einem Unfall in einem bestimmten Fahrzeugmodell ums Leben zu kommen, mit dessen Gewicht zusammen? Nicht so eng, wie mancher denken mag. Andere Parameter wie die Automarke haben auf das Risiko eines tödlichen Unfalls einen viel größeren Einfluss. Vor allem japanische und deutsche Autos schneiden bei Sicherheitsaspekten besser ab als US-amerikanische oder koreanische Wagen mit vergleichbarem Gewicht. Der Wiederverkaufswert eines Wagens nach fünf Jahren ist sogar enger mit dem Risiko korreliert, dass jemand darin

Was beeinflusst die Sicherheit stärker?





bei einem Unfall stirbt, als mit seinem Gewicht (Grafiken rechts oben). Eine intelligente Konstruktionsweise wiegt offenbar manche Nachteile auf, die – bei bestimmten Unfallszenarien – mit geringerem Gewicht einhergehen können.

Die angebliche Binsenweisheit, dass leichtere Fahrzeuge weniger sicher sind, behindert die Bemühungen, den Benzinverbrauch und Schadstoffausstoß neuer Fahrzeuge zu vermindern, nun schon viel zu lange. Das ist eine Blamage! Zum einen könnten Kraftfahrzeugingenieure den Verbrauch selbst bei gleichem Gewicht verringern. Zum anderen könnte intelligenteres Design leichtere und kleinere Modelle hervorbringen, die genauso sicher sind wie ihre schweren Verwandten.

Im vergangenen Jahr erließ die NHTSA eine größenbasierte Norm für den Spritverbrauch von *light trucks*, also auch von Geländewagen und Minivans. Ab 2010, hieß es darin, dürfen sie nur noch maximal 10 Liter auf 100 Kilometer verbrauchen statt wie bisher 10,5 Liter. Bereits im November 2007 verwarf das US-Bundesberufungsgericht diese Entscheidung allerdings wieder. Die Verbrauchsanforderungen an Transporter wären geringer gewesen als die an Limousinen, ebenso wären größere Transporter – solche mit größerer Spurbreite – gegenüber leichten bevorzugt gewesen.

Doch der Vorgang zeigt: Behörden klammern sich nach wie vor an die Vorstellung, kleinere Fahrzeuge seien weniger sicher als große. Wir und andere Forscher haben aber nachgewiesen, dass diese Vermutung nicht gerechtfertigt ist. Die für den Schutz der Fahrzeuginsassen wichtigen Parameter sind Höhe und Steifigkeit der Frontseite und der Fahrzeugschwerpunkt, aber nicht die Grundfläche des Fahrzeugs. Darüber hinaus zeigten unsere Analysen, dass Pick-ups für die Insassen gegnerischer Fahrzeuge umso bedrohlicher sind, je höher ihr zulässiges Gesamtgewicht ist.

Das vom US-Präsidenten unterzeichnete Energiegesetz von 2008 hält nun fest, dass der durchschnittliche Spritverbrauch von neuen Limousinen und *light trucks* bis 2020 auf unter 6,7 Liter pro 100 Kilometer sinken soll. Auch wenn es sich dabei im eigentlichen Sinne nicht um eine größenbasierte Norm handelt, behandelt es beide Fahrzeugtypen weiterhin unterschiedlich. Während derzeitige Sicherheitsnormen unverändert bleiben, ermutigt es die Verbraucher, weiterhin Benzin fressende und aggressive Pick-ups und SUVs zu kaufen.

Besser wäre es, auf alle leichteren Fahrzeuge dieselben Normen anzuwenden. Müssten alle *light trucks* die gleichen strengen Verbrauchsvorschriften erfüllen, stiegen die Herstellungskosten für größere Pick-ups und Geländewagen zwar deutlich. Doch ein kleiner Preisschock würde viele Verbraucher vom Kauf eines großen Fahrzeugs abhalten, während jenen, die tatsächlich ein Nutzfahrzeug benötigen, ein angemessener Steuernachlass gewährt werden könnte.

Die zusätzlichen Kosten kämen der Sicherheit auf den Straßen und damit der Gesellschaft insgesamt zugute. Zudem würde ein Paket aus Vorschriften für die Kompatibilität und Aggressivität von Fahrzeugen, strengeren Normen für die Stabilität von Autodächern und verbesserten Sicherheitsgurten vermutlich weit mehr Leben retten, als durch strengere Verbrauchsvorschriften möglicherweise gefährdet wären. Es gibt keinen guten Grund mehr, zu glauben, dass man auf unseren Straßen nicht gleichzeitig Menschenleben retten und dem Klimawandel vorbeugen kann. ◁

Thomas P. Wenzel studierte Politikwissenschaft an der University of California in Berkeley. Seitdem arbeitet er am Lawrence Berkeley National Laboratory und forscht seit Kurzem über Emissionen von Fahrzeugen, Treibstoffverbrauch und Fahrzeugsicherheit. **Marc H. Ross** lehrte bis 2001 als Professor für Physik an der University of Michigan. Bevor er sich Fragen von Verkehrssicherheit und Fahrzeugdesign widmete, forschte er vor allem auf dem Gebiet der Energieeffizienz.

Bürkle, H., Bakker, J.: Relevanz der Kompatibilität im realen Unfallgeschehen heute. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, S. 188–194, Juli–August 2006.

Latin, H. et al.: Bad Designs, Lethal Profits: The Duty to Protect Other Motorists Against SUV Collision Risks. In: Boston University Law Review 82, S. 1161–1223, 2002.

Ross, M. et al.: Vehicle Design and the Physics of Traffic Safety. In: Physics Today 59, S. 49–54, Januar 2006.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/965714.

Auf den nächsten Seiten finden Sie eine Sonderpublikation unserer Online-Redaktion: »spektrumdirekt – Die Woche« >>>>

FRÜHGESCHICHTE

Dreifacher Blick auf unsere Vergangenheit

Eine Liebhaberin hat Erkenntnisse aus Archäologie, Sprachwissenschaft und Genetik zu einem opulenten Gesamtwerk verarbeitet.

Als Sir William Jones, weiland Richter in Kalkutta, 1786 in einem Vortrag vor der »Asiatick Society« konstatierte, kein vernünftiger Mensch könne daran zweifeln, dass unter anderem Latein, Griechisch und Sanskrit einer »gemeinsamen Quelle« entsprungen seien, die »wahrscheinlich nicht mehr existiere«, markierte das, so die einschlägigen Lehrbücher, den Beginn der indogermanischen Sprachwissenschaft. Sie nahm im 19. Jahrhundert einen rasanten Aufstieg und erwies sich als höchst effizientes Instrumentarium, um Texte bis dahin unbekannter alter Sprachen zu entschlüsseln: Es gelang den Sprachforschern, ein längst ausgestorbenes Volk, die Hethiter, wieder zum Sprechen zu bringen, nachdem feststand, dass ihre Sprache ebenfalls der indogermanischen oder, wie man heute bevorzugt sagt, der indoeuropäischen Sprachfamilie zuzuordnen ist. Nicht selten konnte man hochzufrieden vermelden, dass eine bisher nur rekonstruierte Form nunmehr tatsächlich aufgetaucht war, und damit die Zuverlässigkeit der Methode unter Beweis stellen. Die Klassifikations- und Rekonstruktionsmethoden der Indogermanistik erwiesen sich als ohne Weiteres auf andere Sprachfamilien übertragbar. So fanden die Forscher sprachliche Verwandtschaftsverhältnisse und konnten damit historische Abläufe nachzeichnen, für die es keine schriftlichen Dokumente gibt.

Heute ist es in der deutschen Universitätslandschaft eher still um diese Wissenschaft geworden. Etliche Institute für Indogermanistik sind in den letzten anderthalb Jahrzehnten geschlossen worden; die allgemeine Sprachwissenschaft geht längst ihre eigenen Wege, und zwar mit Siebenmeilenstiefeln. Entsprechend gibt es kaum neuere deutschsprachige Einführungen in die Materie, obgleich sie für die Aufhellung der frühen Menschheitsgeschichte nach wie vor unentbehrlich ist.

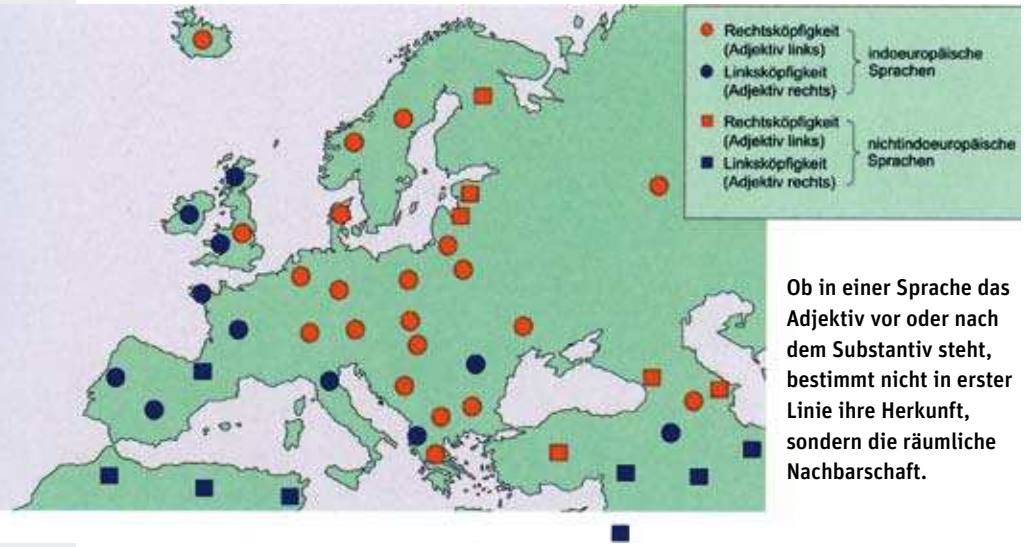
In diese Lücke stößt nun Elisabeth Hamel, selbst keine ausgewiesene Indogermanistin, sondern Dilettantin: Liebhaberin im ursprünglichen, keineswegs despektierlichen Sinn des Wortes. In drei Großkapiteln führt sie Archäologie inklusive Vor- und Frühgeschichte, vergleichende Sprachwissenschaft und Genetik zusammen, um die Frage nach dem »Werden der Völker in Europa« zu beantworten. Wir erfahren von Megalithen, Glockenbechern und Bandkeramik, von Lautwandel, Sprachtypologie und Sprachbünden, von Rhesusfaktoren, der molekularen Uhr und der mitochondrialen Eva; damit gewinnen wir schließlich ein umfassendes Bild von Fragestellungen und Arbeitsweise der jeweiligen Wissenschaften und von dem Beitrag, den sie zur Klärung der Leitfrage zu leisten vermögen.

Gelegentlich spülen die Wogen der Begeisterung die Autorin auch in Gefilde abseits der eigentlichen Reiseroute, aber das ist kein Schaden: Den Horizont erweitert es allemal. Im Übrigen empfiehlt Hamel selbst, Teile, die man weniger unterhaltsam findet, einfach zu überspringen, und hat ihr Buch entsprechend angelegt.

Bei einem so ambitionierten Unterfangen kann die eine oder andere Panne kaum ausbleiben. Die Behauptung, erst die Römer hätten eine »Geschichtsschreibung im engeren Sinne« entwickelt, wirft die stirnrunzelnde Frage auf, als was dann die Werke der griechischen Autoren Herodot und Thukydides aufzufassen seien, die zu einer Zeit schrieben, da von römischer Literatur noch nicht die Rede sein konnte. Auch löste der Sieg der Germanen über Varus keineswegs den Zerfall des Römischen Reichs aus; bis Romulus Augustulus, der letzte Kaiser Westroms, von Odoaker in Pension geschickt wurde, dauerte es noch gut viereinhalb Jahrhunderte.

Vor allem aber hätte die Frage nach dem Verhältnis von Schriftlichkeit und Mündlichkeit ein wenig mehr Aufmerksamkeit verdient. Gerade in den letzten zwei Jahrzehnten ist die Sprachwissenschaft stark von der Vorstellung abgerückt, die geschriebene Sprache sei ein lediglich abgeleitetes Phänomen, das nur den Blick auf das »Eigentliche«, nämlich die gesprochene Sprache, verstelle, und hat sie als Forschungsgegenstand eigenen Werts in den Blick genommen. Wenn Hamel etwa als Beleg für einen Wandel in der Syntax anführt, dass »der heutige Durchschnittssprecher große Verbklammern, wie sie noch bei Heinrich von Kleist oder Jean Paul zuhauf auftreten, vermeidet«, so darf man Zweifel daran anmelden, dass der literarische Sprachgebrauch ausgerechnet eines Jean Paul repräsentativ für den Durchschnittssprecher seiner Zeit gewesen sein soll.

Dementsprechend sind zum Beispiel auch die Ausführungen zum Verhältnis von Aussprache und Schreibung nicht ganz auf dem Stand der Forschung; die gängige Ansicht, dass eine Schrift wie etwa die unsere zu einem bestimmten Zeitpunkt die Laute einer Sprache eins zu eins auf Buchstaben oder fixe Buchstabenkombinationen abbilde und dass dieser Zustand grundsätzlich erstrebenswert sei, darf als überholt gelten. Zudem spielt der Unterschied zwischen dem eher abstrakten »Phonem« und dessen je nach lautlicher Umgebung innerhalb des Wortes höchst variabler Realisierung (»Allophone«) eine entscheidende Rolle. Hier führt die höchst ehrenwerte Absicht Hamels, die Darstellung möglichst terminolo-



Ob in einer Sprache das Adjektiv vor oder nach dem Substantiv steht, bestimmt nicht in erster Linie ihre Herkunft, sondern die räumliche Nachbarschaft.

giefrei zu halten, zu einer Vereinfachung, die zumindest für meinen Geschmack etwas zu weit geht.

Vermutlich hätten auch Archäologen oder Genetiker an dem einen oder anderen Punkt entsprechende Anmerkungen vorzubringen; grundsätzlich aber ist Hamel ausgezeichnet informiert und achtet erfreulich sorgfältig darauf, gesicherte Erkenntnisse von Hypothesen abzugrenzen. Das ist ihr umso höher anzurechnen, als gerade in diesem Sektor etliche Dilettanten (diesmal im weniger freundlichen Sinne verstanden) die wildesten Spekulationen verbreiten.

Für wen ist das Buch gedacht? Die Einschätzung der Autorin »hauptsächlich für Schüler … ohne einschlägige Vorkenntnisse« ist etwas zu bescheiden. Erwachsene Leser müssen sich das Vergnügen an einem außerordentlich liebevoll gestalteten, flüssig (wenn auch gelegentlich mit Anflügen pädagogischer Betulichkeit) geschriebenen und geradezu opulent mit Abbildungen ausgestatteten Band nicht versagen. Man kann das Buch besten Gewissens allfälligen Nichten und Neffen für den Geburtstagstisch besorgen – aber Vorsicht: Wer der Versuchung erliegt, zuerst selbst ein bisschen darin herumzuschmökern, mag es vielleicht gar nicht mehr hergeben.

Vera Binder

Die Rezensentin hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

Elisabeth Hamel
Das Werden der Völker in Europa
Forschungen aus Archäologie, Sprachwissenschaft und Genetik
Tenea, Berlin 2007. 464 Seiten, € 34,50

ORNITHOLOGIE

Schöner als biologisch erforderlich

Singen Vögel nicht nur, um Partner anzulocken, sondern um – wie ein Mensch – Musik zu machen?

Dass beim Vogelgesang die Ästhetik eine weitaus größere Rolle spielt, als es evolutionstheoretische Nützlichkeitserwägungen nahelegen, ist oftmals thematisiert worden. Bereits Charles Darwin (1809–1882) stellte in seinem epochalen Werk »Die Abstammung des Menschen« fest, dass Vögel »einen Geschmack für Schönes« haben. Julian Huxley (1887–1975) war davon überzeugt, dass die Gesänge alles andere als »rein funktional« sind. Wenn also David Rothenberg, Professor für Philosophie am New Jersey Institute of Technology in Newark, Vogelgesang sogar als »Musik« bezeichnet und eine gemeinsame »Ursache für Schönheit« bei Vogel und Mensch vermutet, kann er sich auf illustre Vorbilder berufen.

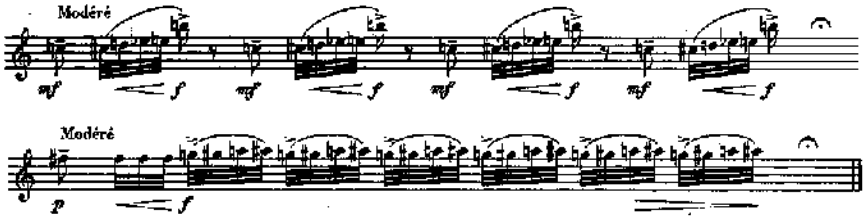
Rothenberg will bei seiner »musikalischen Spurensuche« die »Kluft zwischen Empirie und Ästhetik« interdisziplinär überbrücken. Erst wenn wir die Laute der Vogelwelt als Musik, als Kunst auffassen, so Rothenberg, gewinnen wir auch einen Zugang zu den Geheimnissen des Vogelgesangs. Zur Revierverteidigung oder zur Anlockung eines Sexualpartners genügt es, zu krächzen wie ein Rabe oder zu tschilpen wie ein Spatz. Insofern ist das, was uns etwa europäische Nachtigallen, amerikanische Spottdrosseln oder australische Leierschwänze gesanglich darbieten, ungleich bedeutender als die damit verbundene Funktion.

Auch der große amerikanische Ornithologe Wallace Craig (1876–1954), den immerhin Konrad Lorenz als seinen »einflussreichsten Lehrer« bezeichnete, sah keine biologische Notwendigkeit für musikalische Komplexität und Schönheit. In einem Brief an Craig aus dem Jahr 1940 bekräftigt Lorenz: Der Vogelgesang »ist sicherlich schöner als nötig und ähnelt in dieser Hinsicht der menschlichen Kunst im Allgemeinen«. Aus »evolutionistischer« Sicht, so Lorenz weiter, sei es sogar »eher lächerlich«, die Möglichkeit zu bestreiten, dass es etwas Ähnliches wie Kunst nicht auch bei anderen Arten geben könne.

Heutzutage macht sich wohl eher lächerlich, wer Musik und Vogelgesang gleichermaßen als »organisierte Klänge um ihrer selbst willen« betrachtet. Und für streng wissenschaftliche Vogelkundler sind Kapitelüberschriften wie »Du lässt mein Herz singen«, »Den Klang in sich aufnehmen« oder »Zum Vogel werden« eine herbe Zumutung. Doch es lohnt, sich auf diesen eigenwilligen Autor einzulassen. Dass Rothenberg im Vogelpark von Pittsburgh einen Weißhaubenhäherling auf seiner Klarinette begleitet oder sich im australischen Busch mit einem Braunrücken-Leierschwanz zur Jam-Session verabredet, macht ihn noch nicht zum esoterischen Schwärmer. Freimütig gesteht der passionierte Jazzer ein, dass es viel einfacher sei, zusammen mit Vögeln zu musizieren, als streng wissenschaftliche Forschung zu betreiben.

Sobald es um die Frage »Warum Vögel singen« (und nicht nur »wie« oder »wozu«) geht, sind die Aussagen von Musikern, Dichtern und Denkern ebenso relevant wie die der Wissenschaftler. Nur die Poesie, so Rothenberg, kann die Schönheit des Vogelge-

Der australische Braunrücken-Leierschwanz vollführt jeden Tag im Winter ein spektakuläres und kräftezehrendes Ritual aus Gesang und Tanz.



Der Komponist Olivier Messiaen (1908 – 1992) hat den Gesang des Großen Brachvogels in Notenschrift transkribiert – einschließlich der Dynamikbezeichnungen.

sangs in Worte fassen. Nur die Musik erklärt, wie sich über eine »Abfolge von Tönen ohne Botschaft« dennoch so etwas wie Schönheit vermitteln lässt. Die Wissenschaft kommt erst ins Spiel, wenn es um objektive und unangreifbare Aussagen geht. Über all diese Erkenntnisse in der Zusammenschau zu reflektieren, ist wiederum Aufgabe der Philosophen.

Das interdisziplinäre Spektrum dieses außergewöhnlichen Vogelbuchs reicht in der Philosophie von Aristoteles über John Locke und Immanuel Kant bis Ludwig Wittgenstein, in der Poesie von Lukrez über Samuel Taylor Coleridge und John Keats bis Kurt Schwitters und in der Musik von Vivaldi über Mozart und Beethoven bis Olivier Messiaen. Dennoch nimmt die Darstellung wissenschaftlicher Befunde den größten Raum ein, sowohl in der Textlänge als auch in der Anzahl der Abbildungen und Anmerkungen. Beinahe jeden, der Rang und Namen in der modernen Vogelgesangsforschung hat, hat Rothenberg persönlich konsultiert – und ist dabei stets auf ebenso freundliches Interesse wie nachhaltige Skepsis gestoßen.

Zwar halten auch renommierte Ornithologen wie Peter Slater, Donald Kroodsma und Peter Marler komplexe Vogelgesänge für ein Rätsel. Aber einen Bezug zur menschlichen Ästhetik erkennen sie nicht. Fernando Nottebohm erklärt denn »diesen ganzen Musikansatz« unmissverständlich für »wirklich Wahnsinn«. Doch Kunst, so Rothenberg, benötige nun einmal keine Daten. Sie kann auch nicht durch »eine Analyse ihrer Aussagekraft« ersetzt werden – selbst wenn sie in Millionen Jahren auf natürlichem Weg entstanden sei. Ebenso wenig könne man doch das Gesangssystem im Gehirn eines Kanarienvogels als Ersatz für den Gesang nehmen. Die Wissenschaft ist – sobald es um das »Warum« geht – genau wie die Kunst »reich an Hypothesen, aber arm an Schlussfolgerungen«.

Musik, so das Kredo dieses höchst bemerkenswerten und anspruchsvollen Buchs, ist genauso Ausdruck für das Wesen eines Vogels wie für unser eigenes. Die Menschheit jedoch wird im Gegensatz zu den Vögeln – die ja bereits seit Jahrmillionen musizieren – »nie die richtige Melodie treffen«. Denn unsere Musik unterliegt dem Wandel der Kultur. Es ist jedenfalls eine »engstirnige« Auffassung von Musik, nur den Menschen einzubeziehen. Und dass die Wissenschaft noch nicht in der Lage ist, »Freude« zu messen, bedeutet ja nicht, dass Vögeln das Singen keinen »Spaß« mache. Doch eben diese Freude am eigenen Können ist vielleicht die bedeutsamste Gemeinsamkeit von Vogel und Mensch.

Beweise kann Rothenberg nicht vorlegen. Sein Buch handelt von den »Möglichkeiten« einer gut begründeten Spekulation. Allerdings nimmt er mit größter Genugtuung den Nachweis von Erich Jarvis zur Kenntnis, dass sich im Zebrafinkenhirn beim Singen der Dopaminspiegel erhöht; diesem Neurotransmitter wird eine gewisse Rolle im Belohnungssystem zugeschrieben. Doch die Frage »Warum singen Vögel?« ist für ihn ohnehin »subjektiv« längst geklärt: »Aus den gleichen Gründen wie wir – weil wir es können.«

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

David Rothenberg
Warum Vögel singen
Eine musikalische Spurensuche
Aus dem Amerikanischen von Andreas Held.
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2007. 313 Seiten, € 24,95

ELITE

Wo liegt das deutsche Oxford? In Oestrich-Winkel

In Deutschland ist der Begriff »Elite« wieder in Mode; die zugehörige Praxis wirft dagegen viele Fragen auf.

Eigentlich hat Julia Friedrichs, Jahrgang 1979, an dem Auswahltest der Unternehmensberatung McKinsey nur im Rahmen einer journalistischen Recherche teilgenommen, um mehr über diese publizitätsscheue Firma zu erfahren. Zu ihrer großen Überraschung besteht sie den Test und wird auf einen Segeltörn in die Ägäis eingeladen: eine Schnuppertour in die Welt der Reichen und Mächtigen, die »Elite von morgen«.

Da prallen Welten aufeinander für die Tochter eines sozialdemokratischen Lehrers aus dem Münsterland, die von Kind auf das Ziel verinnerlicht hat, »die Schwachen zu stützen und nicht jene zu fördern, denen sowieso vieles leichtfällt«. Mehr noch: Unversehens gerät die Begegnung zur persönlichen Anfechtung. Auf der einen Seite schätzen die Vertreter der Elite Julias bisherige Karriere – Standardstudium an der Standarduniversität Dortmund – und damit auch gleich ihre ganze Person als misslungen ein; andererseits fürchten die Mitglieder ihrer Wohngemeinschaft, darunter ihr Freund Tom, sie werde jetzt in andere Sphären entschweben.

Es macht die besondere Qualität dieses Buchs aus, dass die Autorin sich nicht, wie üblich, auf eine der beiden Seiten schlägt und es dabei bewenden lässt, sondern mit großem Fleiß dem Phänomen »Elite« nachrecherchiert. Sie besucht private Elitehochschulen wie die European Business School (EBS) in Oestrich-Winkel im Rheingau (»Zwar klingt die Aufzählung Harvard, Oxford, Oestrich-Winkel noch etwas gewöhnungsbedürftig, aber im Gegensatz zu den USA oder England hat Deutschland ja mit der Elitepflege gerade erst begonnen.«), die Bayerische Elite-Akademie in München, eine Kindertagesstätte, die zum Basissatz von knapp tausend Euro monatlich die süßen Kleinen auf das Leben an der Spitze der Gesellschaft vorbereitet, ein exklusives Internetforum namens schwarzekarte.de, mehrere Edelinternate und etliche Plätze mehr.

Da finden sich auch die »Pressen«, die für teures Geld die unmotivierten Kinder

betuchter Eltern durchs Abitur hieven, und jede Menge Mittzwanziger, die nur dümmlich-arrogant ihren Reichtum zur Schau stellen. Das gibt viel Stoff für Sozialneid; aber noch verstörender sind die Leute, die ihr ganzes Leben mitsamt Freizeit und Freundschaften ihrer Karriere unterordnen. Wer weniger als 70 Stunden pro Woche arbeitet, gilt als »Minderleister«. Und: »Jeden Morgen wacht in Afrika eine Antilope auf und weiß, sie muss schneller laufen als jeder Löwe, um zu überleben. Jeden Morgen wacht in Afrika ein Löwe auf und weiß, er muss schneller laufen als die langsamste Antilope.« Ist das wirklich die Welt, in der sich die nächste Generation der Studienabsolventen behaupten muss? Genügt es wirklich nicht mehr, seine Arbeit gut zu machen und sich im Übrigen etwas Selbstverwirklichung – oder auch Abhängen vorm Fernseher – zu gönnen?

Die Autorin ist wohltuend frei von ideologischer Verbohrtheit. Sie gibt offen zu, dass das gute Leben mit gediegener Wohnqualität, einem Wohnumfeld ohne Penner, komfortablen Verkehrsmitteln und anderen Annehmlichkeiten auch für sie einen erheblichen Reiz hat. Desgleichen hat sie absolut nichts dagegen einzuwenden, wenn außergewöhnliche Begabung und hohe Leistungsbereitschaft ihren Trägern einen Spitzenplatz in der Gesellschaft mitsamt diesen Annehmlichkeiten einbringen. Nur sind diese persönlichen Eigenschaften im Allgemeinen weniger hilfreich als Papas Geld und die »Chemie«, dieses Gemisch aus Einstellungen und Verhaltensweisen, an dem der Chef in dem Bewerber seinesgleichen erkennt und deswegen eher geneigt ist, ihn einzustellen.

Allgemeinbildung, Charakter, Bereitschaft zu selbstständigem Denken oder auch nur politisches Interesse hat Julia Friedrichs bei ihren Gesprächspartnern nur sehr wenig gefunden. Ausgerechnet Guido Westerwelle muss seine verdutzten Zuhörer von der EBS daran erinnern, dass nicht nur der Stärkste überleben soll, sondern auch der Schwache und Schwächste.

Ein immer wieder geäußertes Lebensziel ist »Verantwortung übernehmen«, und dabei denken die meisten Angehörigen der Jung-Elite nur an das Eine: Unternehmensberater werden, über das Schicksal von Leuten entscheiden, von denen man sich bewusst abgesetzt hat. »Mit dem Begriff ›Elite‹ ist ein Konzept verbunden, das eine Spaltung der Gesellschaft vorsieht. ›Elite‹ heißt ›Masse‹ auf der anderen Seite. Anders lässt sich das nicht deuten«, so der Lebenslaufforscher Michael Hartmann, den Friedrichs ausgiebig zitiert.

In den alten Zeiten, als es in der FDP noch Persönlichkeiten gab, die etwas zu sagen hatten, zählte Ralf Dahrendorf zu den Voraussetzungen für das Funktionieren einer demokratischen Gesellschaft »die Buntheit und Vielfalt ihrer Eliten«. Von diesem Konzept sind die Leute, die heute so offensiv den Elitebegriff im Munde führen, meilenweit entfernt.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Julia Friedrichs
Gestatten: Elite
Auf den Spuren der Mächtigen von morgen
Hoffmann & Campe, Hamburg 2008. 256 Seiten, € 17,95

Exklusiv für Abonnenten

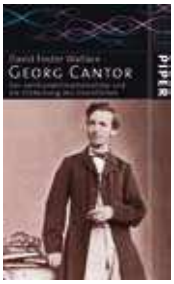
Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg / Dynamikum, Science Center, Pirmasens

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de



MATHEMATIK

Da gähnt die Kluft zwischen den zwei Kulturen

David Foster Wallace scheitert stilistisch amüsant, in der Sache jämmerlich am Begriff des Unendlichen.

David Foster Wallace hat sich in den USA einen Namen als avantgardistischer Romancier und Essayist gemacht. Mit Vergnügen habe ich seine Essays über Verkaufsmessen für Pornofilme gelesen, über massenhaftes Hummeressen, über die in Wörterbüchern versteckte Politik und über die Kampagne John McCains gegen George W. Bush um die republikanische Präsidentschaftskandidatur anno 2000. Seither weiß ich, dass Wallace einen höchst eigenwilligen Stil pflegt, mit vielen, manchmal seitenlangen Fußnoten und unzähligen Abkürzungen, die immer wieder zum Hin- und Herblättern zwingen.

Ich war also gewarnt: Wenn Wallace über das Unendliche schreibt, kommt gewiss kein normales Buch über Mathematik heraus. Umso besser, dachte ich. Ein schräger Blick auf Zenons Paradoxien und Cantors transfinite Zahlen kann nicht schaden.

Es beginnt recht viel versprechend. Wallace präsentiert sich zugleich als tiefgründiger Kenner der Geistesgeschichte und als Therapeut, der dem Leser die Furcht vor ihren mathematischen Abgründen nehmen will. Es ist auch gar nicht übel, wie er die zenonschen Paradoxien gegen den voreiligen Schluss in Schutz nimmt, sie hätten sich schon durch die Infinitesimalrechnung von Newton und Leibniz am Ende des 17. Jahrhunderts erledigt. Erst viel später, im 19. Jahrhundert, bekommt das unendlich Kleine mit dem Limesbegriff von Bolzano und Weierstraß eine exakte Formulierung.

Aber »wie« unendlich sind eigentlich die reellen Zahlen, mit denen man dabei rechnet? Georg Cantor (1845 – 1918) gibt darauf völlig überraschende Antworten und formuliert neue Probleme des Unendlichen – vor allem die bis heute unbewiesene und unwiderlegte Kontinuumshypothese, wonach die reellen Zahlen salopp gesagt nur um eine Stufe unendlicher sind als die rationalen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Das alles erzählt Wallace auf seine mutwillig weitschweifige, mit Querverweisen und Fußnoten spielende Weise; aber ich war ja gewarnt, und sein essayistisches Spiel gefiel mir.

Allerdings funktioniert das nur, wenn die Fakten stimmen. Und da hat Wallace, anders als bei Pornomessen, Hummerfestivals, Wörterbüchern und Wahlkämpfen, die notwendige Sorgfalt in grotesker Weise vernachlässigt. Der große Zahlentheoretiker namens »Hermine« (richtig: Hermite), die katastrophale Weglassung eines »nicht« bei der Definition der »transzendentalen« (richtig: transzendenten) Zahlen und die »Ordnungszahlen« (richtig: Ordinalzahlen) mögen noch auf das Konto des deutschen Lektorats gehen. Aber die Leistungen des Autors selbst lassen sich in folgendem Theorem zusammenfassen: Eine wallacesche Formel sieht vielleicht in ägyptischer Finsternis wohl geformt aus, entpuppt sich aber bei Licht besehen als grotesker Witz.

Ein schlagendes Beispiel für mein Wallace-Theorem liefern die Seiten 170 bis 175, in denen Wallace anhand eines rätselhaft beschrifteten Diagramms in einem Aufwasch Differenzieren und Integrieren vorführen möchte. In einer Fußnote moniert der Übersetzer einen Zahlenfehler, der aber angeblich für die nachfolgende Herleitung nichts ausmachen soll. Das stimmt; denn die ganze Argumentation ist ohnehin absoluter Nonsens, ein freies Assoziieren mit kursiven Buchstaben und mathematischer Schulbuchprosa. Ich habe eine Stunde damit zugebracht, irgendeinen gut versteckten Sinn dahinter zu suchen – vergeblich.

Weitere Belege für das Wallace-Theorem sind über das ganze Buch verstreut. Einen besonderen Narren hat der Autor an der Formel für fouriersche Reihen gefressen. Er schreibt sie mindestens dreimal unter wechselndem Namen, mit verschiedenen Klammern, anderen Indexbuchstaben oder mit fälschlich angehängten Punkten hin. Auf Seite 250 steht eine simple Limesformel zweimal untereinander, einmal mit Resultat 1, einmal mit 0.

Das heißt: Schon lange, bevor Wallace zu dem eigentlich schwierigen Teil kommt, den transfiniten Zahlen, ist er – unter aktiver Mithilfe des Piper-Lektorats – derart zur durchaus unfreiwilligen Karikatur eines Autors populärer Mathematikbücher geworden, dass man ihm kein Wort mehr glauben mag. Nun, da es wirklich kompliziert und selbst für mathematisch Gebildete neu wird, wirkt sich die Schlamperei erst recht verheerend aus. Auf Seite 306 wird die cantorsche Definition der transfiniten Zahlen schon mit dem ersten Satz verhunzt: »*P* sei eine unendliche Punktmenge erster Gattung« (richtig: zweiter Gattung). Und später behauptet Wallace, seine verschiedenen Formulierungen der Kontinuumshypothese seien alle äquivalent, was, wie anscheinend fachlich versierte Leser in Internetforen moniert haben, gar nicht stimmt.

Damit komme ich zur Metaebene meiner Kritik. Im Internet findet man auf Englisch und Deutsch viele Lesermeinungen zu Wallaces Buch, und diese Meinungsmenge zerfällt in zwei deutlich geschiedene Untermengen: Hymniker und Flucher. Die einen, und das sind deprimierend viele, loben das Buch ähnlich wie der Klappentext: »David Foster Wallace erzählt hier in meisterhafter Prosa die Geschichte der Entdeckung des Unendlichen seit den frühen Griechen.« Die anderen, auch nicht wenige, fluchen wie ich über Wallaces bombastisch kostümierte mathematische Schlamperei.

Erst die Metakritik offenbart das eigentlich Traurige an dem Fall: Die berüchtigte Kluft zwischen den »zwei Kulturen«, hier gähnt sie wie eh und je. Auf der einen Seite Leser mit schwacher Ahnung von Mathematik, die sich von Wallace in ihrem Halbwissen bestätigt und kumpelhaft in den Arm genommen fühlen. Ihnen gegenüber stampfen die mathematisch gebildeteren Leser vor ohnmächtiger Wut herum wie Rumpelstilzchen, weil sie sich nicht in, sondern auf den Arm genommen fühlen.

Und ich hatte so sehr gehofft, einer wie David Foster Wallace hätte das Zeug, die dumme Kluft mit einem literarisch kühnen und mathematisch kenntnisreichen Buch zu überbrücken.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

David Foster Wallace
Georg Cantor
Der Jahrhundertmathematiker und die Entdeckung des Unendlichen

Aus dem Amerikanischen von Helmut Reuter und Thorsten Schmidt. Piper, München 2007. 407 Seiten, € 22,90

Wissen zahlt sich aus

Spektrum-Jubiläumsrätsel

von Elke Reinecke

1978 – 2008

Seit 30 Jahren erscheint die Zeitschrift »Spektrum der Wissenschaft«. Die in dieser Zeit angehäufte Information wird es den Lesern der ersten Stunde erleichtern, auch das zweite Rätsel unserer Serie zu lösen. Abermals jedoch wird man andere Quellen zu Rate ziehen – und ein bisschen um die Ecke denken müssen.

Wissen lohnt sich – in unserem dreiteiligen Jubiläumspreisrätsel erhöht es die Chancen auf einen Gewinn.

Tragen Sie in die Kästchen unter dem Kreuzworträtsel die Buchstaben ein, die Sie unter der entsprechenden Nummer im Kreuzworträtsel rechts gefunden haben. 31+ bezeichnet den rechten Nachbarn von Feld 31. Das Lösungswort bezeichnet ein (bislang ungelöstes) wissenschaftliches Preisrätsel.

Senden Sie uns das Lösungswort mit dem Stichwort »Jubiläumspreisrätsel Oktober« per Post, Fax oder E-Mail an Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Fax 06221 9126-751, service@spektrum.com.

Einsendeschluss ist der 24. Oktober 2008. (Es gilt das Datum des Poststempels.) Eine Barauszahlung der Preise ist nicht möglich. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Unter allen Einsendern der richtigen Lösung des Oktober-Rätsels verlosen wir:

ein FORTIS Official Cosmonauts Set
Seit Oktober 1994 gehört das Set zur offiziellen Ausstattung der Kosmonauten. Set-Ausstattung: FORTIS Official Cosmonauts Chronograph mit Metallband, Lederband und Klettband, Spezialwerkzeug zum Bandwechsel sowie eine Metalldose zur Aufbewahrung von Zubehörteilen (Wert: € 2450,–)

eine FORTIS Spacematic
Neueste Schweizer Technologie garantiert bis zu 60 Tage Gangreserve ohne Batterie, da sich die Uhr durch die Bewegungen ihrer Trägerin automatisch aufzieht. Ein poliertes Stahlgehäuse und kratzfestes Saphirglas schützen das Innere der Uhr (Wert: € 1155,–).

ein H-Racer-Set
Modellauto mit Brennstoffzelle und eigener solarbetriebener Wasserstofftankstelle

30 Fischer Weltalmanach 2008
Die wichtigsten Zahlen, Daten, Fakten zu allen 194 Staaten der Erde: übersichtlich, farbig, umfangreich

WICHTIGE INFORMATIONEN

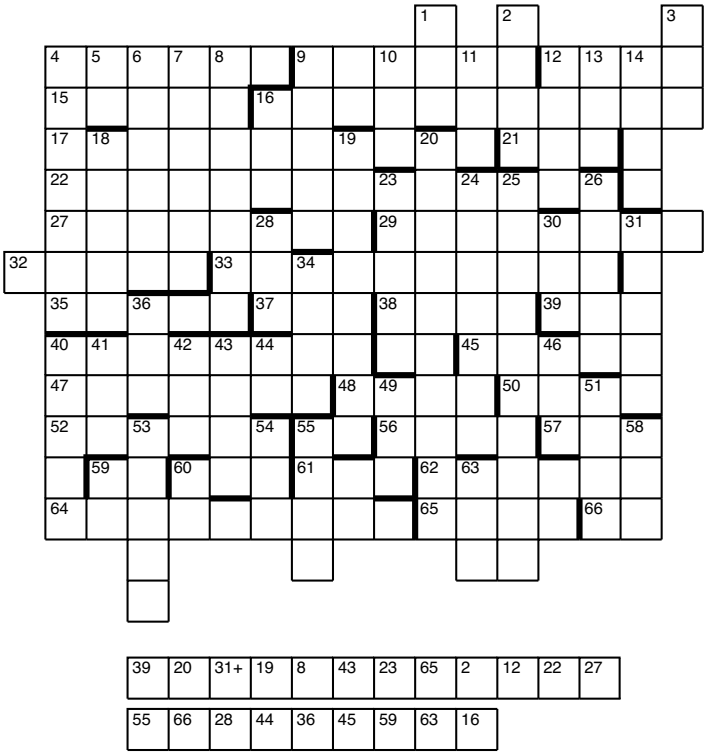
Auch im November wird es ein Preisrätsel geben, in dem ein Lösungswort gesucht wird. Und das Mitmachen lohnt sich doppelt. Denn neben den drei Monatsziehungen gibt es noch eine Schlussverlosung. Dort haben alle diejenigen die Chance auf einen Zusatzgewinn, die uns die Gesamtlösung schicken. Unter allen Einsendern der richtigen Gesamtlösung verlosen wir:

einen Reisegutschein für eine Studiosusreise
(Wert: € 2400,–)

drei große Kulturführer
Mit diesem Standardwerk, bestehend aus fünf Bänden, haben Sie einen fundierten Überblick über alle bedeutenden kulturellen Werke der Menschheit.

sowie 100 weitere Preise

Bewahren Sie die kompletten Lösungen von September bis November auf, aus ihnen ergibt sich die Gesamtlösung. Die Lösungen der drei Preisrätsel geben wir in der Januar-Ausgabe 2009 bekannt. Die Gewinner werden im Januar benachrichtigt.



39	20	31+	19	8	43	23	65	2	12	22	27				
55	66	28	44	36	45	59	63	16							

Waagerecht

4 gab dem früheren New Brunswick Museum seinen Namen
9 dort wurden die damals größten Kernkraftwerk-Blöcke der Welt in Betrieb genommen
12 Frischkäse und Holz in einem Wort
15 Abfallprodukt bei der Selbstverteidigung des Körpers
16 ein lachhaftes Forschungsgebiet
17 Echse aus Noa (Familienname)
21 Tageswind am Gardasee
22 Plaka von Pelikan ist eine Kasein-
27 nicht nur Verbrecher setzen sich gern ab
29 den Angriff bevorzugend
32 da ist Tolfenaminsäure drin
33 Aggregationstendenz der Menschen
35 kinotauglicher Neurologe (Nachname)
37 wirkt sehr anziehend
38 diese Antikörper sind bei einer Reihe von Autoimmunkrankheiten erhöht (Abk.)
39 erdnaher Asteroid, der die Erdumlaufbahn kreuzt (engl. Abk.)
40 farbenfrohe Meerkatze
45 Primärtranskripte (engl. Abk.)
47 hier wird die Vorarlberger Natur zur Erlebnisschau
48 wenn die Aorta eine Engstelle hat
50 Vergangenheitsbewältigung im Spektrum-Verlag
52 ursächlich
55 Strategie auf Chinesisch
56 dieses Gewächs gibt es schon ewig
57 zeigt mehr als Röntgen (engl. Abk.)
60 so verstehen sich Programme mit HTML
61 findet man im bayrisch-österreichischen Gebirge
62 wächst zum Beispiel in 61 waagerecht
64 die Knollen der Knabenkräuter gaben ihnen den Namen
65 wurde früher mit Federn kombiniert
66 das gibt es zur Basis 10

Senkrecht

1 deutsches Gegenteil von 63 senkrecht
2 am 10. Dezember geht es nicht nur in Stockholm nobel zu
3 norwegischer Mathematiker
4 seit Darwin nicht mehr ganz wörtlich zu nehmen
5 daran demonstrierte Kolumbus seine pragmatische Einstellung
6 langlebiges Gewächs unserer Astronomiezeitschrift
7 Ackernüsschens Nachname
8 nahm Teile der Theorie seines berühmten Enkels vorweg (Vorname)
9 hat in Heidelberg studiert, und sein Gesicht ziert den 10-Lewa-Schein
10 Publikationsweg für verkannte Genies (engl. Abk.)
11 besonders Rolls-Royce baute noch lange solche Motoren (engl. Abk.)
12 Blütenstand bei Asterngewächsen
13 diesen Antikörper findet man vor allem auf Schleimhäuten (Abk.)
14 sie hinderte die Bürger von New Orleans im Jahr 2005 an der Rückkehr
16 grafische Benutzeroberfläche (engl. Abk.)
18 die kleinste mögliche Unendlichkeit
19 Bilder bildende Grabhügel
20 Wahlverwandtschaft
23 Schallmesstechnik
24 Ajatollah Chamenei gehört dazu
25 magnetisch bleiben aus alter Gewohnheit (Plural)
26 verursacht im Übermaß Adipositas
28 Fernerkundungssatellit der ESA
30 Buchstabe des hebräischen Alphabets
31 das hatten Newton und sein Lehrer Barrow gemeinsam
34 diese Spinnen beherrschen den Lassowurf
36 zirkulierende zelluläre Nukleinsäure
40 milli-milli
41 Ausdehnungsrichtung in der vierten Dimension
42 Konkurrenz zu Dolby Digital und SDDS
43 diese Firma machte den Umbau für HALO
44 das haben Infrarot und Iridium gemeinsam
46 oberhalb von 6000 fängt der Motor an zu heulen
49 Verbindungsstecker für extrem schnelle Netzwerkverbindungen (Abk.)
51 so nimmt man 26 senkrecht zu sich
53 dieses Geschwür geht recht tief
54 diese Falte im Gesicht hat jeder
55 nach der Urmutter benannter Asteroid
58 diese Berufsbezeichnung stammt vom lateinischen Wort für Kriegsgerät ab (Abk.)
59 Frühform von Qubit
63 Held aus »Matrix«

VORSCHAU

Heft November 2008
ab 28. Oktober im Handel

IM NOVEMBER-HEFT 2008

Im Jahr 1880 formulierte der Berliner Physiologe Emil du Bois-Reymond die sieben Welträtsel aus damaliger Sicht. Zum 30. Geburtstag von Spektrum hat die Redaktion namhafte Forscher wie Jens Reich und Anton Zeilinger gebeten, zu den großen Herausforderungen für die Wissenschaft unserer Zeit Stellung zu nehmen. Lesen Sie in unserer Jubiläumsausgabe ihre faszinierenden Berichte über den heutigen Stand der Welterkenntnis und die bedeutenden noch offenen Fragen.

30 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

Die neuen WELTRÄTSEL

Die größten Herausforderungen für die Wissenschaft

QUANTEN-PHYSIK
Was ist Realität?

MATERIE
Wann gibt es die Theorie von Allem?

KÜNSTLICHES LEBEN
Wesen vom Reißbrett

GENOMIK
Was macht den Menschen aus?

GEHIRN
Wurzeln der Intelligenz

ALTERN
Auf dem Weg zur Unsterblichkeit?

MAX DELSON / ISTOCKPHOTO

spektrumdirekt
DIE WOCHE

SONDERAUSGABE | DIE WISSENSCHAFTSZEITUNG IM INTERNET | OKTOBER 2008

DAS AKTUELLE STICHWORT

Hurrikane

Hintergründe zu Katrina, Gustav und Co

Im Juni startet die atlantische Hurrikan-Saison – bis November hält dann die Angst vor zerstörerischen Wirbelstürmen die Bevölkerung der Küstenstädte und der karibischen Inseln in Atem. Die Schäden liegen nicht selten in Milliardenhöhe.

Hurrikane entstehen unter anderem erst dann, wenn sich das Oberflächenwasser in ihrem Entstehungsgebiet auf mindestens 26,5 Grad Celsius erwärmt und gleichzeitig die im Bereich des tropischen Wirbels aufsteigende Luft in der Höhe rasch abgeführt werden kann. Dies war insbesondere vor der heftigen Hurrikansaison 2005 der Fall, als ein stabiler Hochdruckrücken über den östlichen Vereinigten Staaten und dem westlichen Nordatlantik die Hurrikane mit gedeihen ließ.

Treffen dann so genannte atmosphärische Wellenstörungen – die Easterly Waves, die aus Tiefdruckgebieten in Westafrika hervorgehen können – auf diese vorteilhaften Bedingungen, beginnen sie Feuchtigkeit aus dem Meer zu saugen. Im Atlantik ist dies nur von Juni bis November in einem relativ schmalen Band zwischen dem 5. und 30. Breitengrad nördlich des Äquators möglich, südlich davon bis zum Äquator selbst verhindert die hier sehr schwache Ablenkung durch die Corioliskraft eine Entstehung – sie ist nötig, um die Luftmassen überhaupt in Rotation zu versetzen.

Die aufgenommene Feuchtigkeit kondensiert in höheren, kühleren Atmosphären-

Fortsetzung Seite 4

Rotrücken-Zaunkönige singen im Urwald im Duett, damit sich Paare leicht wiederfinden – und um Eindringlinge akustisch zu bekämpfen.

© DALE MORRIS

VERHALTENSFORSCHUNG

VOM KRIEGE

Vögel bekämpfen sich mit Schall und pflegen Verbündete

Tiere sind uns in vielem sehr ähnlich – und manchmal ähnlicher, als uns vielleicht lieb sein kann. Etwa wenn es gilt, Haus, Hof und die Liebste zu verteidigen: Von der Art der Konfliktlösung bis zur Betreuung von Alliierten gibt es viele Parallelen zu uns.

von Daniel Lingenhöhl

Krieg ist die Fortsetzung der Politik unter Einbeziehung anderer Mittel«, so schreibt der preußische General und Militärtheoretiker Carl Philipp Gottlieb von Clausewitz in seinem Buch »Vom Kriege«. Bis heute zählen seine Gedanken und Lehren zu den maßgeblichen Werken der Strategie, Taktik und Philosophie der modernen Kriegsführung – selbst im Bereich der Wirtschaftslehre fanden sie Eingang.

Und womöglich lässt sich der Satz auch auf die Tierwelt übertragen – auf die Art und Weise, wie Vögel beispielsweise ihr Revier oder Weibchen erobern und verteidigen. Während der Balz versuchen die Männchen die Angebetete vornehmlich mit zivilen Mitteln zu überzeugen: Sie stellen prächtige Federn zur Schau wie Pfauen und Paradiesvögel, bauen raffinierte Liebesnester wie die Laubenvögel und Beutelmeisen oder bezirzen die Auserwählte mit lieblichen Gesängen wie Nachtigallen oder Grasmücken. Ihre Einflusssphäre stecken sie durch

Fortsetzung Seite 2

Liebe Leserin, lieber Leser,

selbst als Chefredakteur der Internetzeitung spektrumdirekt halte ich immer gerne Papier in den Händen und genieße gut geschriebene und gestaltete Druckerzeugnisse. In meiner Arbeit und bei der Befriedigung meines täglichen Informationsbedürfnisses aber überwiegt längst das Internet.

Die Redaktion von spektrumdirekt ist mit Leib und Seele »online«. Ab sofort bieten wir jedoch über die tägliche Berichterstattung hinaus mit der ersten Wochenzeitung zur Wissenschaft im deutschsprachigen Raum eine Publikation, die einer gedruckten Zeitung sehr nahe kommt. Ein Beispiel der neuen, wöchentlich erscheinenden PDF-Ausgabe, die sich spektrumdirekt-Premium-Abonnenten per E-Mail zusenden lassen können, finden Sie auf den nächsten Seiten und unter www.spektrumdirekt.de/info

Richard Zinken
Chefredakteur spektrumdirekt

Jenseits vom Jenseits Seite 7

Differenzierte Abmahnung Seite 8

LHC – Aufbruch in neue Dimensionen Seite 13

DenkMal Seite 11 (Auflösung Seite 15)

Impressum: spektrumdirekt ist eine Publikation der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg
Chefredakteur (v.i.S.d.P.): Richard Zinken | Redaktion: Antje Findeklee, Dr. Andreas Jahn, Dr. Jan Osterkamp

VOM KRIEGE, FORTSETZUNG VON SEITE 1

© DALE MORRIS

»So wie sich Fans beispielsweise nach einer Niederlage ihrer Mannschaft in der Kneipe bemitleiden, unterstützen sich auch die Baumhopfe nach einem Wettkampf mit Rivalen«

(Andrew Radford)

WISSENSCHAFTLER MIT ROTRÜCKEN-ZAUNKÖNIG
Daniel Mennill Aug in Aug mit einem Rotrücken-Zaunkönig im Regenwald Costa Ricas

»Krieg ist die Fortsetzung der Politik unter Einbeziehung anderer Mittel«

(Carl von Clausewitz)

Gezwitscher ab oder markieren sie durch gezielt platzierte Kothäufchen nebst drapierter Federn, wie jüngst vom Uhu berichtet wurde. Wehe aber, ein Nebenbuhler reagiert nicht auf die friedlichen optischen und akustischen Signale. Dann tragen Amseln mit ihren Schnäbeln Gefechte aus, treten sich Birkhühner im Kampf mit Füßen und attackieren Kampfläufer einander mit aufgeplustertem Federkragen – eine Fortsetzung der Revierpolitik unter Einbeziehung anderer Mittel. Etwas weniger handfest, aber dennoch kriegerisch gehen die mittelamerikanischen Rotrücken-Zaunkönige *(Thryothorus rufalbus)* aufeinander los, wie Daniel Mennill von der University of Windsor in Ontario und Sandra Vehrencamp von der Cornell University in Ithaca im Urwald Costa Ricas bemerkten [1]. Die Vögel setzen eine ganz besondere Waffe zur Verteidigung ihrer Jagd- und Brutgründe ein: aggressiven Duettgesang.

Lärmend ins Gefecht

»Der erste Eindruck ihrer Duettgesänge ist einer höchster Harmonie und Kooperation«, beschreibt Mennill, wie die Lautäußerungen der Zaunkönige auf zufällige Beobachter wirken. Bisweilen stimmen sich die Vögel so gut ab, dass ihr Zwiegesang wie ein Solo klingt. Im dichten Regenwald helfen sie dem singenden Pärchen, Kontakt miteinander zu halten, wenn sie voneinander getrennt Nahrung suchen, oder sich wiederzufinden, nachdem sie einzeln durchs Unterholz huschten. Und es dient wahrscheinlich auch dazu, die Bindung der Vögel untereinander zu festigen, vermuten die Forscher: Mit Hilfe von acht an unterschiedlichen Orten aufgestellten Mikrofonen und Triangulation der aufgezeichneten wechselseitigen Ansprachen konnten sie belegen, dass die Zaunkönige ihre Aktivitäten über den Gesang synchronisieren.

Doch das sind offenbar nur Teilaspekte des Duetts, so Mennill: »Es existiert auch noch eine dunkle Seite. Die Vögel nutzen es ebenso als aggressive akustische Kriegsführung.« Als die beiden Ornithologen ein besetztes Revier mit den Klängen eines fremden Pärchens beschallten, reagierten die eigentlichen Inhaber sehr heftig. Auf jeden Gesang der Konkurrenten folgten aufgeregte eigene Lieder: »Ihre Sangesrate schoss durch die Decke. Jede Einspielung wurde zornig beantwortet.« Während die Zaunkönige in den 20 Minuten vor den Auftritten der vermeintlichen Invasoren nur durchschnittlich ein Duett anstimmten, schnellte deren Zahl in der gleichen Zeitspanne danach auf knapp sieben in die Höhe. Die Weibchen pfiffen dabei zumeist auf ihre Geschlechtsgenossinnen, während die Männchen vor allem mit ihresgleichen in den Sangeswettstreit eintraten.

Wie erfolgreich die Melodien eingesetzt werden, um die eigene Heimat zu verteidigen, ohne dass doch noch körperliche Attacken folgen, müssen erst weitere Studien zeigen. Und auch was die Rotrücken-Zaunkönige nach dem Duell tun, liegt noch im Dickicht des Regenwaldes versteckt – eventuell pfeifen sie ein fröhlicheres Lied, um sich wieder abzureagieren. Vielleicht handhaben sie es aber auch wie die Baumhopfe *(Phoeniculus purpureus)*, denen Andrew Radford von der University of Bristol nachstellte [2]. Diese Vögel ziehen in Gruppen von bis zu acht Individuen durch die Baumsavannen des tropischen Afrikas: ein brütendes Pärchen und meist sechs, in Einzelfällen sogar zehn Begleiter, die bei der Versorgung des Nachwuchses helfen.

Streicheleinheiten nach dem Konflikt

Obwohl sie vorerst nur Hilfsdienste leisten dürfen und nicht selbst ihre Gene weitergeben, bleiben interne Konflikte rar: Ein striktes Warteschlangensystem legt fest, wer wann am Zug sein und unterstützt werden wird, und bei der Nahrungssuche zum Eigenbedarf behalten sie über Zurufe Abstand voneinander. So friedlich sie in der Gruppe agieren, so entschieden geben sie sich nach außen, wenn benachbarte Baumhopfe ihren Einfluss ins fremde Habitat ausdehnen wollen: Ähnlich wie bei den Rotrücken-Zaunkönigen attackieren die Vögel einander mehrmals am Tag verbal mit heiserem Gekrächz, an dem sich alle erwachsenen Gruppenmitglieder beteiligen. Zwischen 1 und 45 Minuten

© CLAIRE SPOTTISWOODE

BAUMHOPF
Ein südafrikanischer Baumhopf in Nahaufnahme

»Es existiert auch noch eine dunkle Seite«

(Daniel Mennill)

© DALE MORRIS

© CHRIS VAN ROOYEN

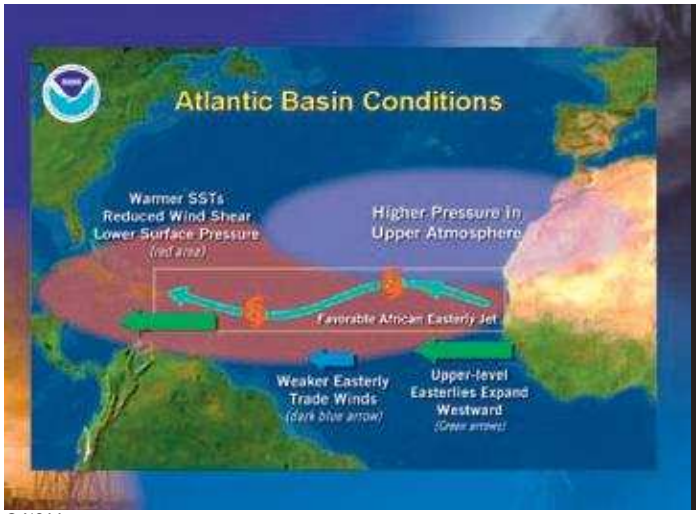
BAUMHOPFPÄRCHEN
Baumhopfe betreiben nach verbalen Auseinandersetzungen mit Konkurrenten besonders intensive Körperpflege mit ihren Artgenossen. Damit wollen sie die Gruppenbindung stärken und Stress abbauen.

können diese »vokalen Konflikte« dauern, bis sie entschieden sind und sich Gewinner von Verlierern scheiden – nur selten steigern sie sich zu handfesten Auseinandersetzungen. Gleich ob Sieg oder Niederlage – danach legen die Vögel ein Verhalten an den Tag, das den britischen Forscher an die Fußballanhänger seiner Heimat erinnert: »So wie sich Fans beispielsweise nach einer Niederlage ihrer Mannschaft in der Kneipe bemitleiden, unterstützen sich auch die Baumhopfe nach einem Wettkampf mit Rivalen.« Die Gruppe rückt zusammen, putzt und krault sich mit ihren Schnäbeln. Gerade nach verlorenen Wettbewerben geschah dies sehr viel intensiver und häufiger als zu konfliktfreien Zeiten, wie Radford schreibt.

Zärtlichkeiten spendete dann auch meist das Brutpaar, wahrscheinlich um ihre untergeordneten Artgenossen wieder aufzubauen und zu stärken für neue Auseinandersetzungen, so der Biologe: »Das Putzen baut vermutlich Stress ab und fördert den Zusammenhalt der Gruppe. Gerade nach verlorenen Schlachten ist das besonders wichtig.« Damit erhöhe sich die Wahrscheinlichkeit, dass die subalternen Hopfe auch beim nächsten Mal wieder an der Seite ihrer Leittiere zur Verteidigung antreten. Die Verbände, die die konfliktreichsten Verhältnisse zu ihren Nachbarn haben, pflegen daher auch die intensivsten Sozialkontakte und putzen sich am häufigsten. Und das ist auch gut so, wie ebenfalls schon von Clausewitz wusste: Treue Verbündete erschweren es einem Gegner, den Krieg zu führen und zu gewinnen. <<

[1] **Mennill, D., Vehrencamp, S.:** Context-Dependent Functions of Avian Duets Revealed by Microphone-Array Recordings and Multispeaker Playback. In: Current Biology 18, S. 1–6, 2008.
[2] **Radford, A.:** Duration and Outcome of Intergroup Conflict Influences Intragroup Affiliative Behaviour. In: Proceedings of the Royal Society B 10.1098/rspb.2008.0787, 2008.

HURRIKANE, FORTSETZUNG VON SEITE 1



© NOAA

ENTSTEHUNGSHILFEN FÜR HURRIKANE
Gegenwärtig herrschen im Atlantik Bedingungen, die die Entstehung von Hurrikanen begünstigen – etwa erhöhte Wassertemperaturen, hoher Luftdruck in höheren Atmosphärenschichten und häufige Wellenstörungen in der Luftbewegung.

schichten zu Wolken und setzt große Mengen an Kondensationswärme frei, die wiederum das Innere des Wirbelsturms aufheizt. Dadurch wird mehr Luft um einen zentralen Punkt kreisend aufwärtsgesaugt: Das Auge des Sturms beginnt sich zu bilden. Das gesamte kreisförmige Tiefdruckgebiet kann einen Durchmesser von mehreren hundert Kilometern und Windgeschwindigkeiten bis zu 300 Kilometer pro Stunde erreichen. Das hingegen windschwache und oft wolkenfreie Auge ist meist nur 15 bis 30 Kilometer groß, kann aber auch bis zu 70 Kilometer messen.

Die sich entgegen dem Uhrzeigersinn spiralig nach innen drehenden Wirbelstürme, die mit 5 bis 20 Kilometern pro Stunde recht langsam ziehen, bewegen sich anfangs mit der vorherrschenden atmosphärischen Strömungsrichtung erst stets westwärts. Sobald die ablenkende Corioliskraft mit zunehmender Entfernung zum Äquator stärker wird, drehen die Hurrikane dann langsam Richtung Norden ab, in Einzelfällen können sie allerdings über Mittelamerika hinweg bis zum Pazifik ziehen. Erreichen sie Festland, kommt es zu starken Verwüstungen und sintflutartigen Regenfällen und Überschwemmungen. Da die Hurrikane aber ständigen Energienachschub an warmer, feuchter Luft brauchen, um ihre Stärke zu behalten, verlieren sie an Land schnell ihre Kraft und werden zu gewöhnlichen Tropenstürmen mit allerdings immer noch ergiebigen Niederschlägen.

Eingeteilt werden die Stürme nach der so genannten Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala, die von 1 bis 5 reicht: Je intensiver der Luftdruck in Bodennähe absinkt, desto stärker fällt der Zyklon aus. Erreichen seine Spitzengeschwindigkeiten etwa 120 Kilometer pro Stunde, fällt er in die niedrigste Hurrikan-Kategorie 1, die mit leichten Überschwemmungen und Schäden an Bäumen oder Wohnwägen noch relativ harmlos ist. In Kategorie 5, die »Katrina« zeitweise erreichte, wehen die Winde dann schon mit mehr als 250 Kilometern pro Stunde; meterhohe Wellen branden an die Küste, Gebäude werden teilweise völlig zerstört und viele Bäume geknickt oder entwurzelt. (dl/jo) <<

DOSSIER Hurrikane

© NASA

© NASA

© NOAA

@ www.spektrumdirekt.de/hurrikane

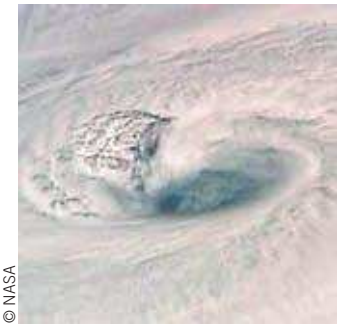
KLIMATOLOGIE

Die Starken stärken

Windgeschwindigkeiten von kräftigen Wirbelstürmen nehmen zu

Es ist ein heißes Eisen für die Klimaforscher: Wie wirkt sich der Klimawandel auf die großen Stürme der Erde aus? Werden Hurrikane und Taifune häufiger (eher nicht) oder stärker (schon eher)? Zumindest die kräftigsten Böen scheinen jedenfalls zuzulegen.

von Daniel Lingenhöhl



© NASA

New Orleans kam diesmal glimpflich davon: Hurrikan »Gustav« tankte auf seinem Weg von Kuba zur US-Südküste wider Erwarten weniger neue Energie als befürchtet und machte seinen Landfall etwa 100 Kilometer westlich der Metropole, die nahezu vollständig evakuiert worden war und neue Verheerungen durch Wind und Wasser erwartet hatte. In der Karibik starben zwar wieder Dutzende Menschen, und es entstanden Schäden an der regionalen Infrastruktur in Milliardenhöhe, doch war »Gustav« kein Vergleich mit dem Sturm »Katrina«, der mehr als 1800 Leben forderte und mindestens 40 Milliarden US-Dollar kostete.

Wie auf einer Perlenschnur reihen sich aber zwischen der Karibik und Westafrika schon weitere Hurrikane und tropische Stürme aneinander und bedrohen Leben, Hab und Gut auf den karibischen Inseln und dem amerikanischen Festland: Die Wirbelsturmsaison ist in vollem Gange – Meteorologen erwarten wieder eine überdurchschnittliche Saison wie 2005, als sich 23 benannte Stürme durch den Atlantik walzten, bis den Meteorologen die Namen ausgingen und vier weitere Systeme mit griechischen Zahlworten auskommen mussten. Mit »Delta« zog zudem erstmals seit Aufzeichnungsbeginn eine tropische Tiefdruckfront gen Europa und Nordafrika.

Ob diese Vermehrung der Hurrikane und Taifune nun aber generell zum Trend wird, weil die Erde und damit die Ozeane wärmer werden, kann die Wissenschaft noch nicht sagen – im Gegenteil: Die Klimaforschung ist in dieser Frage äußerst gespalten. Theoretisch müsste ihre Zahl zunehmen, da aufgeheiztes Wasser ihre Entstehung antreibt, beziehen die Tiefdruckwirbel doch ihre gesamte Energie aus dem warmen Meer, das mindestens 26 Grad Celsius haben sollte. Größere Flächen mit Badewannentemperaturen bedeuteten denn auch ein Plus an Stürmen, so die Befürworter der These. Ganz im Gegenteil, meinen dagegen ihre Kritiker: In einer energiereicheren Atmosphäre nähmen auch Scherwinde zu, die den Hurrikan schon im Ansatz wieder zerzausen können – generelle Zunahmen in den verschiedenen Ozeanen seien deshalb keineswegs ausgemachte Sache und zahlenmäßige Schwankungen natürliche Zyklen.

Allerdings: Einmal entstanden, können die verheerenden Gebilde aus Äolus' Reich im Zuge des Klimawandels allerdings stärker werden und leichter zu Wirbelstürmen der beiden höchsten Klassen 4 und 5 heranwachsen, weil sie über größere Regionen hinweg mehr Dampf für ihren Antrieb gewinnen. Eine Ansicht, die unter Sturmforschern zunehmend Zustimmung gewinnt und nun von James Elsner von der Florida State University in Tallahassee und seinen Kollegen ein weiteres Mal bestätigt wird: Mit Hilfe von Satellitenaufzeichnungen seit etwa 1980

© NASA

STÜRME IM ATLANTIK

3-D-Grafik von Hurrikan »Mitch«, der Ende Oktober 1998 Teile Zentralamerikas verwüstet und unter Wasser gesetzt hat. Dabei starben mehrere tausend Menschen. Mitch gehört zudem zu den Wirbelstürmen mit dem stärksten jemals gemessenen Druckabfall in ihrem Umfeld – er war also auch ein extremes Tief.

© NASA

HURRIKAN »GUSTAV« KURZ NACH SEINEM LANDFALL
Hurrikan »Gustav« verschonte New Orleans knapp, brachte aber Tod und Zerstörung in weiten Teilen der Karibik und an der amerikanischen Südstaatenküste.

haben sie untersucht, inwiefern sich die Spitzengeschwindigkeiten von Hurrikanen in diesem Zeitraum veränderten.

Weltweit traten in den letzten rund 25 Jahren zwischen 66 und 95 Wirbelstürme pro Saison auf, ohne dass die Wissenschaftler dabei einen signifikanten Trend nach oben notieren konnten. Auch der Median der Windgeschwindigkeiten blieb nahezu gleich und zeigte allenfalls einen leicht ansteigenden Zug: zwei Ergebnisse, die gegen einen Einfluss des globalen Klimawandels auf die Hurrikangenese sprechen, obwohl sich der Atlantik seit 1981 um etwa 0,7 und der Nordostpazifik um immerhin 0,33 Grad Celsius erwärmt hatten.

Ganz anders sieht es dagegen bei den Spitzenwerten aus: Gerade die stärksten Winde, die in Wirbelstürmen der Kategorie 5 durchaus 300 Kilometer pro Stunde überschreiten können, bliesen während der beobachteten Periode immer kräftiger. Pro Jahr legten sie um etwa einen Kilometer pro Stunde zu – was nach wenig klingt, sich aber potenziert. Denn je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto größer werden seine Kraft, die Windlast wie der Staudruck und damit das zerstörerische Potenzial des Orkans: Die Energie des Sturms beispielsweise steigt mit dritter Potenz.

Fünf von sechs Bildungszentren der Wirbelstürme waren von dieser Entwicklung betroffen, nur der südliche Pazifik bildete eine Ausnahme, während sie im Atlantik und nördlichen Indischen Ozean am stärksten ausgeprägt war: »Unsere Ergebnisse bestätigen, dass die Meere mehr Energie zur Bildung eines kräftigen Wirbelsturms aufbringen, wenn sich das Wasser erwärmt«, fassen es die Forscher zusammen. In Zahlen umgesetzt, bedeutet ein Temperaturanstieg um ein Grad Celsius ein jährliches Plus von vier sehr starken Hurrikanen und Taifunen.

Ganz gesichert sind diese Erkenntnisse jedoch noch nicht, mahnen Elsner und sein Team zur Vorsicht: Weitere Einflüsse wie der Entstehungsort des Sturms, seine Nähe zum Festland, El-Niño- oder Sonnenaktivitäten hatten sie nicht berücksichtigt. Im Jahr 2006 etwa verhinderten El Niño und seine klimatischen Nachwehen, dass allzu viele Stürme sich im Atlantik erhoben. Nur »Gordon« und »Helene« kratzten an der Schwelle zum Monstersturm – der Rest blieb weit unter seinen potenziellen Fähigkeiten. <<

Elsner, J. et al.: The Increasing iltensity of the Strongest Tropical Cyclones. In: Nature 455, S. 92–95, 2008.

NEUTRONENSTERNE

Jenseits vom Jenseits

Wo die energiereichen Teilchen um einen Pulsar entstehen

Im Herzen des Krebsnebels wütet ein Objekt, das bei wenigen Kilometern Durchmesser mehr als eine Sonnenmasse in sich vereint. Mit seiner Energie hält es den ganzen Gas- und Staubkomplex um sich auf Trab. Wie und wo es das anstellt, wird dank einer Eigenschaft des Lichts jetzt etwas verständlicher.

von Maike Pollmann

Man könnte fast Mitleid bekommen, wenn der tragische Tod von Sternen geschildert wird: Nach einem langen, oft turbulenten Leben sind sie vollkommen ausgebrannt und müssen in nicht selten dramatischen Szenarien dahinscheiden. Dabei kann man es sicherlich auch etwas positiver sehen. Wenn leichte Exemplare wie etwa unsere Sonne in die Jahre kommen, setzen sie sich beispielsweise mit einem wunderschön schillernden Nebel ein Denkmal. Das hält dann immerhin für einige tausend Jahre, bis sie schließlich zu einem unscheinbaren Etwas verkümmern, in dem tatsächlich nicht mehr viel Leben steckt. Die massereichen Gestirne hingegen sind eigentlich gar nicht wirklich tot: Vielmehr verwandeln sie sich nur in ein etwas kompakteres Objekt. Dafür müssen sie zwar zunächst in einer gewaltigen Supernova explodieren – ein spektakulärer Abgang. Zumindest ihr Kern bleibt dabei aber erhalten, indem er unter seiner eigenen Gravitation zu einem Neutronenstern zusammenfällt oder bei genügend Ausgangsmasse sogar zu einem Schwarzen Loch.

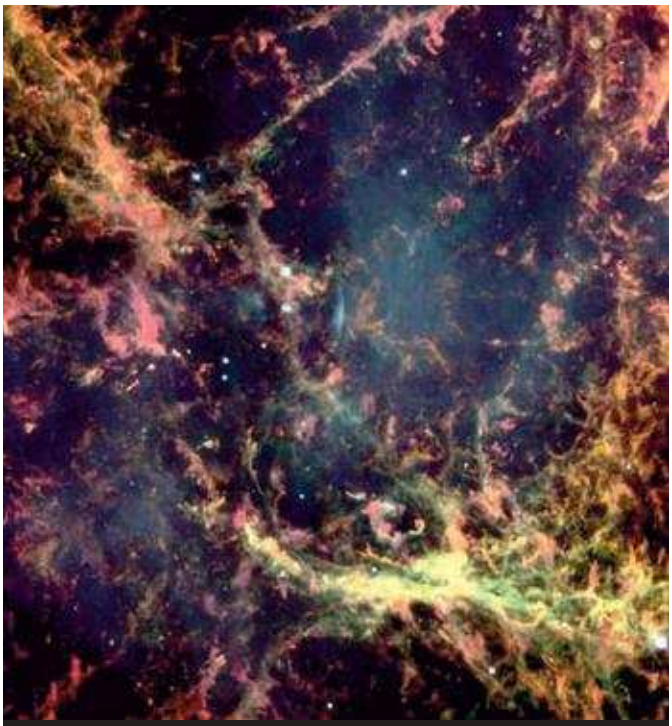
Die dabei entstehende Stoßwelle sprengt die äußeren Hüllen ins All, und dann wird es auch schon wieder schön: Wie auch die Planetarischen Nebel erstrahlen diese diffusen und mehrere zehntausend Grad heißen Gasmassen in bunten Farben am Nachthimmel – nur sind sie um ein Vielfaches größer. Ein Paradebeispiel für einen solchen Supernova-Überrest ist der nur etwa 6500 Lichtjahre von uns entfernte Krebsnebel im Sternbild Stier.

Seine Existenz hat er der Explosion eines Sterns von rund zehn Sonnenmassen zu verdanken, der zu einem schnell rotierenden Neutronenstern kollabierte – etwa dreißigmal pro Sekunde dreht er sich um seine eigene Achse. Im Inneren des zehn Lichtjahre großen Nebels treibt dieser Pulsar seit nun fast tausend Jahren sein Unwesen und verlangsamt sich dabei um 38 Nanosekunden pro Tag. Seine Kraft steckt er unter anderem in seinen Jet, der wie der Strahl eines Leuchtturms auch über unseren Planeten streift. Die scheinbaren Lichtimpulse decken das gesamte Spektrum von Radio- bis hin zu Gammawellenlängen ab.

Der größte Teil seiner Rotationsenergie kommt allerdings seinen elektromagnetischen Feldern und den um ihn wehenden Gürtel aus extrem schnellen Teilchen zugute. Elektronen und möglicherweise auch andere Partikel beschleunigt er hier hundertmal effektiver als die besten Teilchenbeschleuniger auf der Erde. Bei den resultierenden Spitzengeschwindigkeiten und den extremen Magnetfeldern, die in der Umgebung des Pulsars vorherrschen, senden die Elektronen sehr energiereiche Strahlung aus.

All das lässt sich zwar beobachten, doch wie der Energietransfer vom Pulsar auf die umgebende Materie funktioniert, konnten sich die Wissenschaftler bislang nicht erklären. Sie wussten nicht einmal, woher die schnellen Teilchen genau stammen. Tony Dean von der University of Southampton und seine Kollegen kombinierten nun Daten aus 600 einzelnen Beobachtungen des Krebsnebels, die mit Hilfe des Spektrometers an Bord des Satelliten INTEGRAL *(International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)* entstanden waren.

Einen Großteil der Gammastrahlung konnten sie auf den Jet zurückführen, doch auch nicht gepulste Strahlung aus der Nähe des Pulsars war enthalten. Indem sie die Daten mit einer Computersimulation



© NASA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

IM ZENTRUM VON M1
Der Krebsnebel ist der Überrest eines Sterns, der am 4. Juli 1054 als Supernova explodierte. In dieser Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble ist seine innere Struktur abgebildet. Die verschiedenen Farben zeigen die verschiedenen chemischen Elemente in der expandierenden Gaswolke, zum Beispiel Wasserstoff (orange), Stickstoff (rot), Schwefel (rosa) und Sauerstoff (grün). Der Pulsar ist der untere der beiden nur mäßig hellen Sterne nahe der Bildmitte.

© X-RAY: NASA/CXC/ASU/J. HESTER ET AL.; OPTICAL: NASA/HST/ASU/J. HESTER ET AL.

DER KREBSNEBEL
Aufnahmen des Krebsnebels im sichtbaren Licht (rot) sowie im Röntgenbereich (blau) sind hier überlagert dargestellt. Inmitten der Gas- und Staubwolken lässt sich der Pulsar erkennen.

abglichen, stießen sie darin auf linear polarisiertes Licht – hierin schwingen die elektromagnetischen Wellen alle in derselben Ebene senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung.

Die Elektronen, welche die polarisierten Photonen aussenden, müssen in einer Region mit einer gewissen Ordnung oder Symmetrie beschleunigt worden sein, berichten die Forscher. Das Magnetfeld sollte hier also nicht zufällig orientiert sein, sondern eine bevorzugte Richtung aufweisen. Bei genauerem Hinsehen fiel Dean und seinem Team auf, dass die Richtung der Polarisation nach der Drehachse des Pulsars ausgerichtet war. Die Ergebnisse deuten darauf hin, erklären die Astronomen, dass die energiereichen Partikel in direkter Nähe zum Pulsar entstehen, denn weiter von ihm entfernt wäre die Struktur des Magnetfelds sehr komplex. In dem vermuteten Gebiet könnte das Magnetfeld vornehmlich eine donutförmige Gestalt annehmen, spekulieren sie. Diese Geometrie könnte auch für die gebündelten Licht- und Teilchenstrahlen verantwortlich sein.

All dieses Treiben zeigt einmal mehr, wie aktiv ein eigentlich Totgeglaubter noch sein kann. Seine Dynamik beschert dem Krebsnebel fortwährend ein anderes Antlitz und uns damit immer wieder neue Ansichten.

Mit diesem Trick kam der Nebel übrigens auch zu seinem Namen: Ein gewisser William Parsons, alias 3. Earl of Rosse, beobachtete das Objekt 1844 mit seinem großen Spiegelteleskop und stellte eine frappierende Ähnlichkeit zu einem Krebs fest. Einige Jahre später fertigte er mit einem noch größeren Fernrohr eine detaillierte Zeichnung an, die den Spitznamen nicht mehr rechtfertigte. Neben seinen offiziellen Bezeichnungen M1 und NGC 1952 blieb Letzterer aber dennoch erhalten. <<

Dean, A. J. et al.: Polarized Gamma-Ray Emission from the Crab. In: Science 321, S. 1183–1185, 2008.

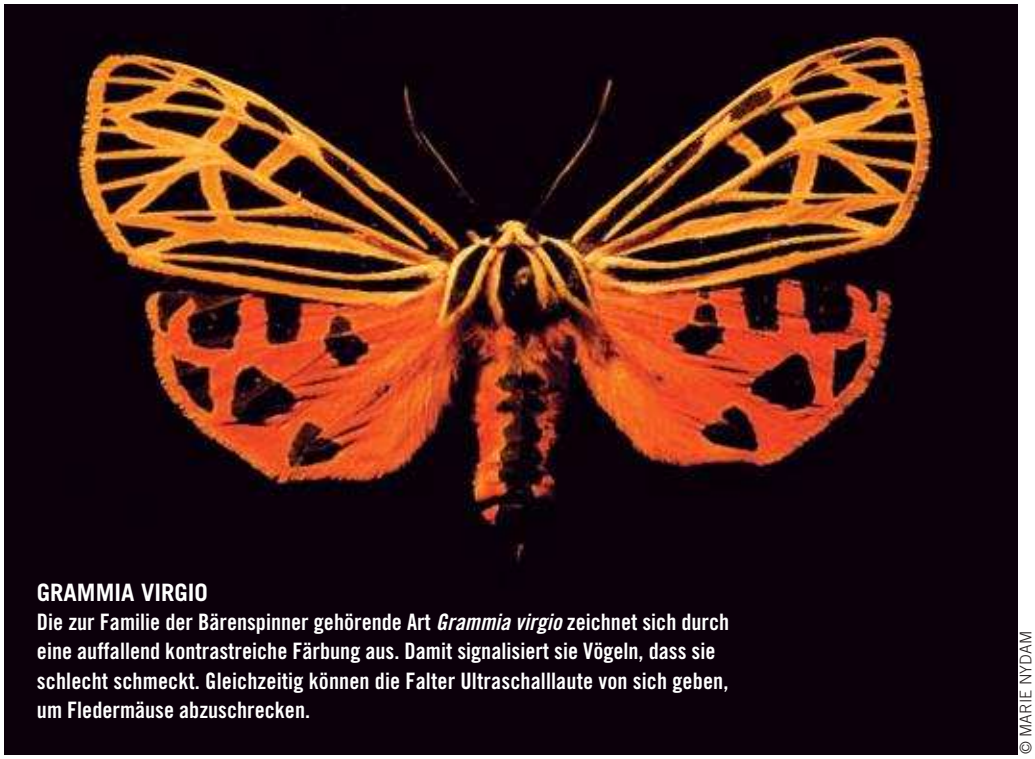
ÖKOLOGIE

Differenzierte Abmahnung

Falter schrecken Fressfeinde nach Bedarf ab

Wie vermeidet man, im Bauch eines hungrigen Räubers zu landen? Ganz einfach: durch widerlichen Geschmack. Dabei gilt es, die kulinarische Ungenießbarkeit dem potenziellen Fressfeind auch rechtzeitig mitzuteilen. Schmetterlinge tun das sehr gezielt.

von Andreas Jahn



GRAMMIA VIRGIO
Die zur Familie der Bärenspinner gehörende Art *Grammia virgio* zeichnet sich durch eine auffallend kontrastreiche Färbung aus. Damit signalisiert sie Vögeln, dass sie schlecht schmeckt. Gleichzeitig können die Falter Ultraschalllaute von sich geben, um Fledermäuse abzuschrecken.

© MARIE NYDAM

Ein fetter Fleischklumpen, der vergnügt durch die Lüfte flattert – für einen hungrigen Vogel genau das Richtige zum Frühstück. Und auch manche Fledermaus möchte sich gern an dem fliegenden Proteinpaket delektieren. Schmetterlinge leben gefährlich.

Doch manche Falter greifen zu einem ziemlich üblen Trick, um nicht im Bauch eines gefräßigen Feindes zu landen: Sie schmecken schlicht ekelhaft. Vor allem die Familie der Bärenspinner hat sich als kulinarische Katastrophe hervorgetan. Manche Arten nehmen bereits in der larvalen Kinderstube übel riechende oder schmeckende Substanzen auf, andere produzieren die chemischen Abwehrwaffen selbst. Aber egal, wie sie an die Schutzstoffe kommen – die widerlichste Chemikalie nützt

nichts, wenn dem Räuber erst schlecht wird, nachdem er den vermeintlichen Leckerbissen heruntergewürgt hat.

Welchen der unterschiedlichen Warnsysteme vertrauen die Insekten mehr? Um dies systematisch zu untersuchen, verglichen die Biologen John Ratcliffe von der Süddänischen Universität in Odense und Marie Nydam von der Cornell University im US-amerikanischen Ithaca die Abwehrstrategien von 26 Falterarten im Südosten der kanadischen Provinz Ontario. Unter den Spezies fanden sich auch in Mitteleuropa heimische Schmetterlinge wie der Zimtbär *(Phragmatobia fuliginosa)*, der Webebär *(Hyphantria cunea)* oder die auch Tiger-»Motte« genannte Gattung *Spilosoma*, die jedoch nicht zur Familie der Echten Motten, sondern ebenfalls zu den Bärenspinnern zählt.

Dabei zeigte sich, dass die fliegenden Beutehäppchen ihre Abmahnung durchaus gezielt einsetzen: Falter, die Anfang Juni bis Anfang Juli schlüpfen, sind meist auffallend gefärbt, dafür auf dem Gebiet des Ultraschallgesangs eher Stümper. In dieser Jahreszeit suchen vor allem Vögel nach Futter für ihre Jungen.

Im Juli bis Mitte August verschiebt sich das Bild. Jetzt jagen hauptsächlich Fledermäuse – und die schlüpfenden Falter wirken eher unscheinbar, erzeugen dafür bei Gefahr Ultraschall-Klicklaute in einer Frequenz von teilweise über 500 Klicks pro Sekunde.

Die differenzierte Abwehr spiegelt nicht nur die unterschiedlichen Jahreszeiten, sondern auch die Tagesrhythmik wider: Tagaktive Schmetterlinge setzen auf visuelle Schreckfarben, Nachtfalter wehren sich akustisch ihrer Haut. Und manche Arten können sogar beides, wie *Grammia virgio*, ein kontrastreich gefärbter, sowohl tag- als auch nachtaktiver Falter, der Mitte Juli schlüpft und Ultraschalltöne in einer Frequenz von bis zu 100 Klicks pro Sekunde von sich geben kann.

Bislang hatten Forscher vermutet, dass Falter die doppelte Abwehr einsetzen, um den potenziellen Räubern die Lektion des schlechten Geschmacks auf zwei verschiedenen Wegen gleichzeitig nahezubringen. Ratcliffe und Nydam vermuten nun eher eine auf jeden Räuber gezielt zugeschnittene Strategie, die sich in der Evolution der Falter bewährt hat. Und wer diese Strategie nicht bestens beherrscht, landet früher oder später im Magen eines Vogels oder einer Fledermaus. <<

Ratclife, J. M., Nydam, M. L.: Multimodal Warning Signals for a Multiple Predator World. In: Nature 455, S. 96–99, 2008.

KREBSFORSCHUNG

Umfassende Genanalyse von Hirn- und Bauchspeicheldrüsenkrebs

Der bislang umfangreichste Einblick in die genetischen Mechanismen zweier Krebsformen – dem Glioblastom im Gehirn sowie dem Pankreaskrebs – liegt vor. Drei Studien stellen die wichtigsten Mutationen zusammen, die derartige Tumoren auslösen können. Glioblastome und Pankreaskrebs zählen zu den besonders aggressiven Krebserkrankungen mit den höchsten Todesraten.

Das im Jahr 2005 von den National Institutes of Health initiierte Forschungsprojekt TCGA *(The Cancer Genome Atlas)* hat sich zum Ziel gesetzt, die genetischen Grundlagen der wichtigsten Krebserkrankungen des Menschen zu kartieren. Jetzt legt das Forschungskonsortium unter der Federführung von Lynda Chin vom Dana-Farber Cancer Institute in Boston seine Ergebnisse zum Glioblastoma multiforme vor [1].

Die Wissenschaftler hatten aus 206 Gewebeproben 601 Gene sequenziert. Neben Mutationen, deren Rolle bei Hirntumoren bereits bekannt war, spürten die Genetiker drei neue Risikogene auf: *NF1*, das bislang als Auslöser für Neurofibromatose galt, das Brustkrebsgen *ERBB2* sowie *PIK3R1*, das einen wichtigen Signalweg im Stoffwechsel steuert.

Außerdem fanden die Forscher heraus, wie das Gen *MGMT* die Wirkung von Temozolomid, einem wichtigen Chemotherapeutikum gegen Glioblastome, beeinflusst: Ist das Gen blockiert, kann Temozolomid DNA-Reparaturenzyme lahmlegen und damit zu einem Versagen der Chemotherapie führen.

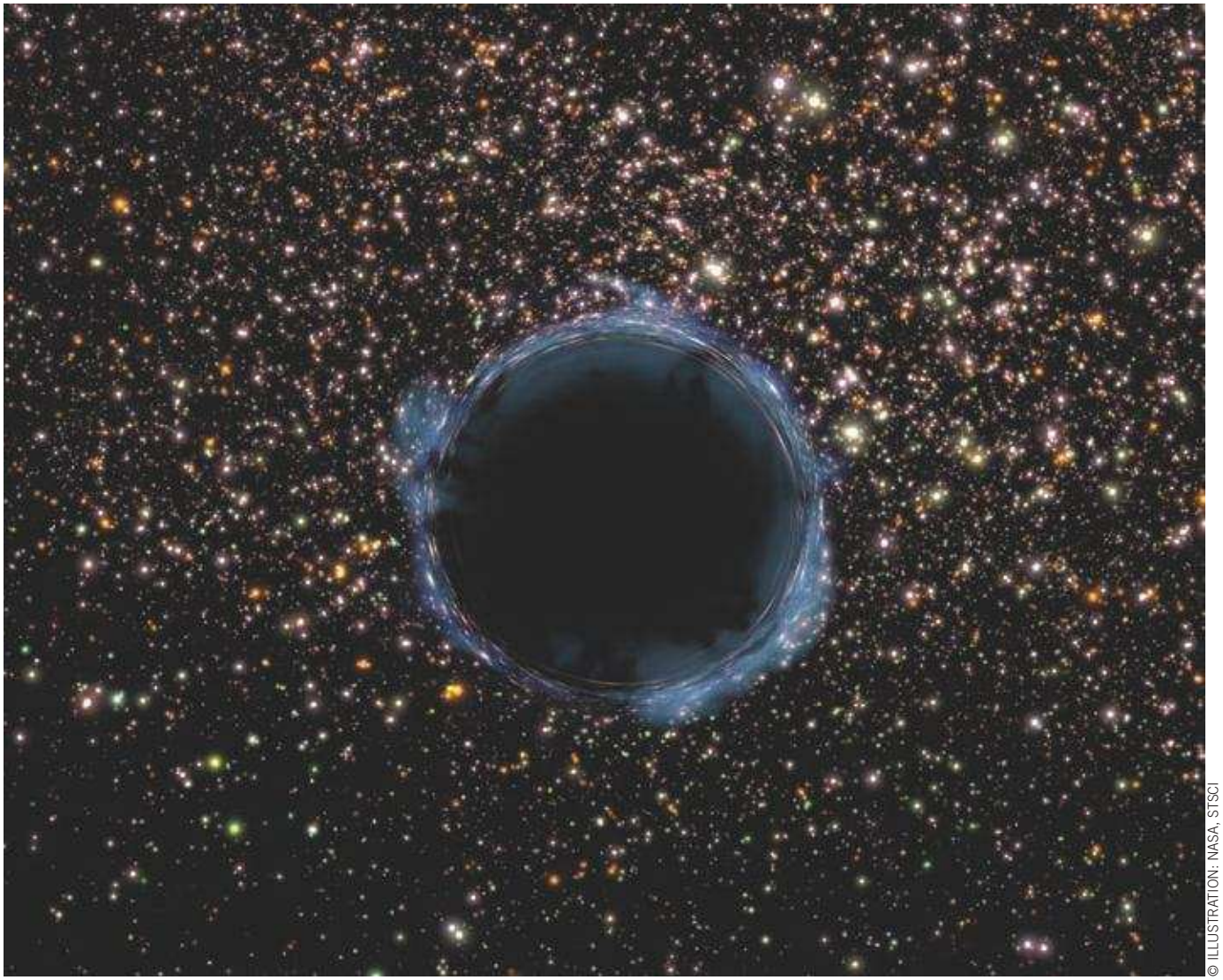
Ähnliche Genveränderungen, die mit Glioblastoma multiforme assoziiert sind, fand auch die Arbeitsgruppe um die Krebsforscher Bert Vogelstein, Victor Veculescu und Kenneth Kinzler vom Howard Hughes Medical Institute in Baltimore, die unabhängig vom TCGA-Projekt an einem Krebsgenomatlas arbeitet. Hierfür hatten sie 20 661 Gene in den Zellen von 22 Glioblastompatienten durchforstet [2].

Hierbei stießen sie auch auf eine Mutation im Gen *IDH1* für das Enzym Isozitrat-Dehydrogenase 1, das in zwölf Prozent der Glioblastome auftrat. Besonders junge Patienten mit Sekundärtumoren waren hiervon betroffen. War nur eine Aminosäure in dem Enzym ausgetauscht, stieg die Überlebensrate der Betroffenen deutlich an.

Dieselbe Arbeitsgruppe kartierte auch die Erbfaktoren, die das Risiko für Bauchspeicheldrüsenkrebs erhöhen: Die Analyse von 24 Patienten offenbarte zwölf Stoffwechselwege, die bei 67 bis 100 Prozent der Pankreastumoren verändert sind [3].

Die Kartierungen zeigten, dass jeder Tumor seine eigene Mixtur von Genveränderungen aufweist, betonen die Forscher. Somit müssten auch Therapien auf jeden Patienten individuell zugeschnitten werden. (aj) <<

[1] **The Cancer Genome Atlas Research Network:** Comprehensive Genomic Characterization Defines Human Glioblastoma Genes and core Pathways. In: Nature 10.1038/nature07385, 2008.
[2] **Parsons, D. W.:** An Intergrated Genomic Aanlysis of Human Glioblastoma Multiforme. In: Science 10.1126/science.1164382, 2008.
[3] **Jones, S.:** Core Signaling Pathways in Human Pancreatic Cancers Revealed by Global Genomic Analyses. In: Science 10.1126/science.1164388, 2008.



© ILLUSTRATION: NASA, STSCI

MILCHSTRASSE

Schwarzes Loch im galaktischen Zentrum vermessen

Sagittarius A*, eine starke Radioquelle im galaktischen Zentrum, markiert neuen Messungen zufolge tatsächlich die Position eines rund vier Millionen Sonnenmassen »schweren« Schwarzen Lochs. Das berichtet ein internationales Astronomenteam um Sheperd Doeleman vom MIT Haystack Observatory, nachdem sie das Objekt so genau wie nie zuvor beobachtet hatten.

Sie nutzten hierfür die VLBI-Technik *(Very Large Baseline Interferometry)*, wobei sie Radioantennen in Hawaii, Arizona und Kalifornien kombinierten. So erhielten die Forscher im Prinzip ein Teleskop mit einem Durchmesser von mehr als 4500 Kilometern und damit eine tausendmal höhere Auflösung als mit dem Weltraumteleskop Hubble. Selbst bei dem rund 25 000 Lichtjahre entfernten Objekt Sagittarius A* lassen sich so noch Strukturen von bis zu 50 Millionen Kilometern erkennen.

Die beobachtbaren Details liegen erstmals in der Größenordnung des theoretisch vorhergesagten Ereignishorizonts – der Grenze zu jenem Gebiet des Schwarzen Lochs, aus dem nicht einmal Licht der enormen Anziehungskraft entkommen kann. Abschätzen lässt sich die Größe von Schwarzen Löchern, wenn ein Gürtel aus Materie um sie kreist. Das kompakte Objekt sollte kleiner als das umgebende Gas sein, welches sich beim Annähern an den Schlund aufheizt und Strahlung aussendet. Doeleman und sein Team beobachteten nun Radiowellen mit einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern.

Mit Hilfe der neuen Daten schätzen sie den Durchmesser von Sagittarius A* auf ein Drittel des Abstands zwischen Erde und Sonne. Dieser Wert unterschreitet die bisher angenommene Größe des für uns erkennbaren Ereignishorizonts. Zudem berechneten sie eine untere Grenze für die dortige Materiedichte und konnten dadurch die meisten Alternativen zu einem Schwarzen Loch für Sagittarius A* ausschließen –

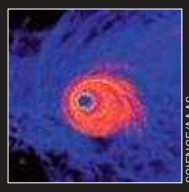
vorausgesetzt, die allgemeine Relativitätstheorie ist korrekt. Die nachgewiesene Strahlung stammt entweder aus der Gas- und Staubscheibe um das Schwarze Loch oder aber aus energiereichen gebündelten Teilchenstrahlen, die aus dieser Akkretionscheibe schießen, vermuten die Forscher.

Analysen mit derselben Technik, aber längeren Radiowellen, hatten die Struktur von Sagittarius A* rund fünfmal schlechter aufgelöst. In den nächsten fünf Jahren sollen Beobachtungen mit noch größeren Teleskopnetzwerken bestimmen, was genau dieses Objekt zum Leuchten bringt. Zwar gibt es jede Menge Hinweise, doch bislang ist die Existenz von Schwarzen Löchern noch nicht endgültig bewiesen. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die meisten Galaxien in ihrem Kern ein supermassereiches Schwarzes Loch besitzen. (mp) <<

Doeleman, S. et al.: Event-Horizon-Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Centre. In: Nature 455, S. 78–80, 2008.

DOSSIER Schwarze Löcher

NASA/JPL-CALTECH

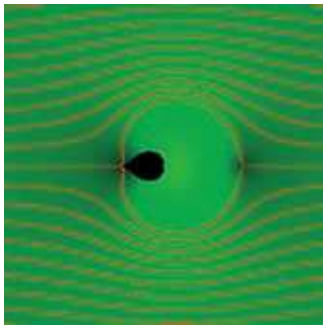

SCIENCE/AAAS

SPEKTRUMDIREKT/NASA

@ www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher

OPTIK

Optische Tarnmäntel theoretisch enttarnt


© UNIVERSITY OF ST. ANDREWS

THEORETISCHER TARNMANTEL
Für Mikrowellen bereits Realität: eine Tarnkappe, die unsichtbar macht

Ein Team von chinesischen Wissenschaftlern um Chen Huanyang von der Jiaotong-Universität Shanghai entwickelte ein theoretisches Modell für einen Anti-Tarnmantel, der die Wirkung eines optischen Tarnmantels teilweise umkehren soll. Bestimmte Materialien würden dabei das Unsichtbare wieder sichtbar machen.

In den vergangenen Jahren experimentierten Wissenschaftler mit speziellen Metamaterialien, die das Licht derart beugen, dass sie um das Objekt geleitet werden und es damit für den Betrachter verschwinden lassen. Gleichzeitig kann aber auch der Versteckte nicht mehr nach außen blicken.

Huanyang und Kollegen schlagen nun vor, die optischen Eigenschaften eines Anti-Tarnmantel-Materials perfekt mit denen der Tarnung abzustimmen. Käme die Tarnkappe in Kontakt mit diesem Material, sollte an jener Stelle etwas Licht gebeugt und das Objekt hier wieder sichtbar werden, berichten die Forscher. Dies würde dem Unsichtbaren erlauben, im Bedarfsfall seine Außenwelt zu erblicken, indem er das Anti-Tarnmantel-Material gegen seinen Tarnumhang drückt.

Bislang funktionieren die Tarnmäntel nur für schmale Wellenlängenbereiche der elektromagnetischen Strahlung, zum Beispiel im roten Teil des Lichts. Das gesamte sichtbare Spektrum umzuleiten, ist bisher noch nicht gelungen.

Gewöhnliche Materialien absorbieren, reflektieren oder streuen die einfallenden Lichtstrahlen. So sehen wir erst unterschiedliche Farben, weil verschiedene Materialien und Beschichtungen mit Licht anders in Wechselwirkung treten. (mp) <<.

DenkMal

Die theoretische Physik behauptet, dass …

a) das Universum elf Dimensionen hat
b) es 1000…00 (hundert Nullen) Paralleluniversen gibt
c) uns 70 Milliarden Teilchen pro Sekunde durchdringen
d) es exakt zweimal mehr Elementarteilchen gibt als bekannt

Welche dieser Aussagen sind richtig? **Auflösung auf S. 15**

Silvia Langer, Traude Fladt
NATUR ENTDECKEN MIT KINDERN
Hrsg. v. Karin Blessing
ULMER (EUGEN)
ISBN: 3800156113

REZENSION

Die Natur zum Freunde

Kommen Kinder im Grundschulalter in unser Naturschutzzentrum in der Nähe von Frankfurt, fällt immer wieder auf, wie distanziert sie von ihrer natürlichen Umwelt aufwachsen: Sei es, um bei einem Naturkundevormittag die Tiere im hauseigenen Teich kennen zu lernen, Tümpelaquarien zu bauen oder als Teilnehmer unserer ökologischen Jugendgruppe den »Lebensraum Garten« zu bearbeiten. Selbst der Aufenthalt im Freien – im geschützten, am Zentrum liegenden Garten – scheint zunächst Schwierigkeiten und manchmal sogar Unbehagen zu bereiten. Bei älteren Kindern oder Jugendlichen, die ein Schülerpraktikum absolvieren, sind vor allem die wenigen Kenntnisse über natürliche Vorgänge und bei einigen auch große Berührungsängste im Kontakt mit der belebten Natur augenfällig.

Der Verlust von Alltagswissen über die heimische Fauna und Flora, über die Zusammenhänge von Landschaft, Landwirtschaft und gesunder Ernährung hat viele verschiedene Ursachen. So gibt es heute nur noch wenig Gelegenheiten, »draußen« zu spielen. Zudem sind die Ablenkungen der modernen Ersatzerlebniswelten TV und PC zu verführerisch. Zunehmend verkommen Natur und Landschaft zu einer grünen Kulisse für Freizeitaktivitäten. Viele Kinder kennen heute mehr Handyklingeltöne als Vogelstimmen, mehr Computerspiele als Wildpflanzen. Sind exotische Zootiere noch interessant, ist die Artenkenntnis der heimischen Tierwelt inzwischen arg reduziert, wenn nicht sogar ganz verschwunden.

Die Autorinnen Silvia Langer und Traude Fladt wollen diesem gesellschaftlichen Negativtrend mit dem Buch »Natur entdecken mit Kindern« etwas entgegensetzen. Mit ihren kreativen Bastelideen, spannenden Experimenten und zahlreichen Spielvorschlägen machen sie die Natur zum Erlebnis für Kinder und Erwachsene. Denn etwas zu erforschen und erkunden gibt es immer und überall: im Gemüse- oder Kräutergarten, im Wald, auf der Blumen- und Streuobstwiese, selbst auf der Trockenmauer und am Wegesrand.

Das Kredo des Autorinnen-Duos lautet: Kinder brauchen Natur. Aber wozu? Ihre Antwort: Ökologische Grundlagen in einem überschaubaren Rahmen vermittelt, erleichtern den Einstieg in globale Zusammenhänge. Dies ist in Zeiten des Klimawandels, des weltweiten Verlustes an biologischer Vielfalt und einer Reihe anderer, durchaus existenzieller Herausforderungen für eine nachhaltige Entwicklung nötiger denn je.

Ich will ein Beispiel geben: Der alte Apfelbaum auf der Streuobstwiese ist nicht nur eine beliebige »grüne Pflanze«, sondern der Lebensraum für eine Vielzahl von Tieren und anderen Pflanzen. Und Teil einer Lebensgemeinschaft, zu der auch wir Menschen gehören. Das Wissen über die Natur ist eine Voraussetzung, um im Sinne einer nachhaltigen Naturnutzung und Umweltvorsorge handeln zu können. Denn nur so werden aus den »Kindern von heute« die »Naturschützer von morgen«. Oder wie es Friedrich Schiller sagte: »Der gebildete Mensch macht sich die Natur zu seinem Freunde.«

Der handliche Naturführer ist mit seinen vielen Anregungen und praktischen Tipps allen Eltern und vielen Umweltpädagogen gleichermaßen zu empfehlen. <<

von Susanne Hufmann
Die Rezensentin ist Biologin und arbeitet im hessischen Naturschutz.

TEILCHENBESCHLEUNIGER

LHC – Aufbruch in neue Dimensionen

Der Large Hadron Collider in Genf soll einmal neue Physik aufdecken, indem er subatomare Teilchen mit enormen Energien aufeinanderschießt. Was die Kollisionen tatsächlich hervorbringen oder auch nicht, wird sich vielleicht schon bald zeigen. Noch in diesem Herbst sind die ersten Testläufe geplant.

von Maike Pollmann

Zwischen Frankreich und der Schweiz liegen rund vier Milliarden Euro unter der Erde begraben. Nicht in Form von Gold oder Diamanten, sondern als 27 Kilometer langer Tunnel voller Stahl, Eisen und Hightech. Die Rede ist vom Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik (Cern) bei Genf. Nach gut zwanzig Jahren der Planung war es am 10. September 2008 endlich so weit: Erstmals wurde der gesamte Speicherring des leistungsstärksten Teilchenbeschleunigers der Welt für Testläufe genutzt. Am 21. Oktober soll dann die offizielle Einweihung stattfinden – ein ursprünglich für das Frühjahr 2005 anvisiertes Ziel.

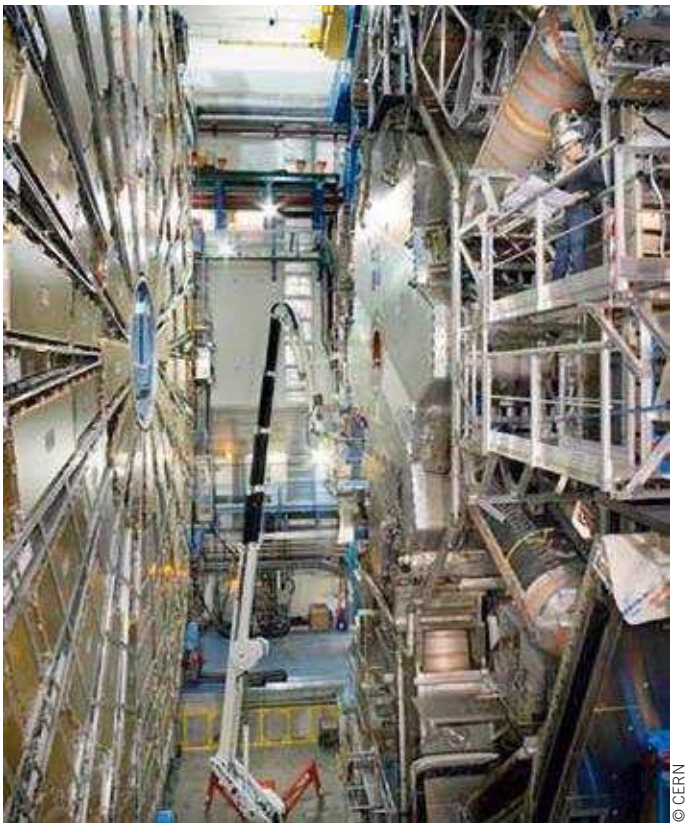
Doch selbst im besten Fall werden noch weitere Monate verstreichen, bis der Koloss seinem Namen endlich gerecht wird und subatomare Teilchen darin mit voller Wucht aufeinanderkrachen. Bei den Geschossen handelt es sich um so genannte Hadronen. Damit bezeichnen Physiker Teilchen, die sich aus Quarks – nach heutiger Ansicht einer der zwei fundamentalen Bausteine der Materie – zusammensetzen. Größtenteils schießen die Physiker im LHC mit Protonen, aber auch Bleiionen werden in einer Tiefe von 50 bis 175 Meter miteinander kollidieren.

Zunächst durchlaufen die Teilchenstrahlen aber eine Kette von Vorbeschleunigern, bevor sie schließlich mit einem Bruchteil der finalen Energie in den LHC eingespeist werden. Die Protonen reisen gleich bündelweise an: 3000 Teilchenpakete à 100 Milliarden Teilchen. Bei jedem Umlauf werden sie mit Hilfe eines elektrischen Feldes weiter beschleunigt und bewegen sich nach rund zwanzig Minuten und Millionen von Umrundungen mit ihrem Spitzentempo von 99,9999991 Prozent der Lichtgeschwindigkeit fort, das heißt, in einer Sekunde durchfliegen sie den 27 Kilometer langen Ring mehr als 11 000-mal.

Maschine der Superlative

Um die Partikel bei derart hohen Geschwindigkeiten auf ihrer Kreisbahn halten zu können, bestückten die Forscher den Ring mit 1800 supraleitenden Ablenkmagneten – jeweils auf etwa minus 271 Grad Celsius heruntergekühlt und damit kälter als der Weltraum. Im Beschleunigerring herrscht zudem ultrahohes Vakuum, denn sonst würde die Luft die Teilchen abbremsen. So lässt sich dann auch die jährliche Stromrechnung von schätzungsweise rund 19 Millionen Euro erklären, die der LHC inklusive seiner Experimente an den gut 270 Arbeitstagen verursacht.

Anstatt mit den kostspieligen Teilchenstrahlen ein fixiertes Ziel anzupeilen, lassen die Wissenschaftler je zwei davon zusammenstoßen. So gibt es schließlich mehr Energie bei der Kollision. In einem mikroskopisch kleinen Bereich prallen die Protonen mit einer Energie von 14 Teraelektronvolt (ein TeV sind 10^{12} eV) aufeinander. Die Strahlen aus

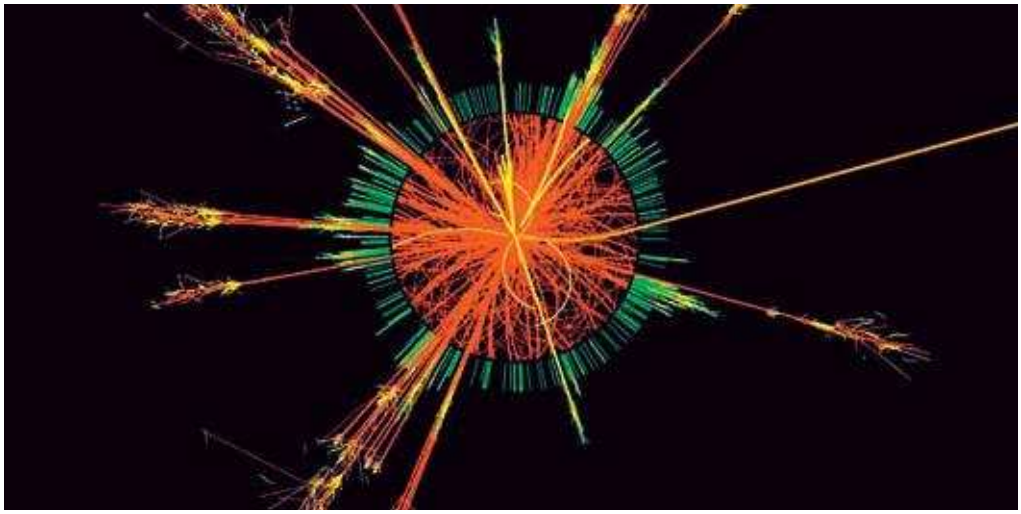


© CERN

ATLAS-DETEKTOR
Der Atlas-Detektor ist im Vergleich zu Menschen ein Riese – auch wenn er sich auf diesem Bild vom November 2007 noch im Bau befindet.

© CERN

IM UNTERGRUND
Ein Ingenieur überprüft unter einem Dipolmagneten, ob die Geräte zum Herabkühlen des Speicherrings funktionstüchtig sind.



© CERN

SCHWARZES LOCH IM DETEKTOR

Diese Spuren sollten im Atlas-Detektor zu finden sein, wenn ein Schwarzes Miniaturloch in den Proton-Proton-Kollisionen entstehen würde. Nach heutiger Erkenntnis sollte es aber unverzüglich in viele verschiedene Teilchen zerfallen und wäre damit absolut harmlos.

Bleiionen bringen es sogar auf 1150 TeV. Beide Kollisionsenergien – oder genauer eine solche Energiekonzentration – sind bislang von Menschen unerreicht.

Verglichen mit den Energien, die uns im Alltag begegnen, ist das aber geradezu lächerlich: Ein Teraelektronvolt entspricht der Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Doch im LHC ist die Energie auf ein Volumen zusammengequetscht, das etwa eine Billion Mal kleiner ist als eine Mücke. Und so herrschen während der Karambolage Bedingungen, wie sie im Universum während des ersten Bruchteils einer Sekunde nach dem Urknall vorzufinden waren. Auf diese Weise hoffen die Forscher, noch nie zuvor nachgewiesene Partikel entstehen zu lassen.

Hoffnung auf Nachwuchs im Teilchenzoo

Und da gäbe es noch eine ganze Heerschar an Kandidaten, die bislang einzig und allein in den Köpfen der Theoretiker herumschwirren – die Verantwortlichen der mysteriösen Dunklen Materie etwa. Doch auch scheinbar simplere Dinge stehen auf dem Plan: Obwohl das Standardmodell der Teilchenphysik die Eigenschaften der Elementarteilchen und der Kräfte zwischen ihnen sehr erfolgreich beschreibt, kann es nicht erklären, warum manche von ihnen schwer und andere leicht sind.

Diese Frage könnte im LHC mit der Entdeckung des bereits in den 1960er Jahren vom Physiker Peter Higgs postulierten Teilchens seine Antwort finden. Nicht ohne Grund wird das Higgs-Boson auch das »Teilchen Gottes« genannt, denn es verleiht den Atomen und damit letztlich auch uns Masse. Je stärker etwas mit diesem Teilchen in Wechselwirkung tritt, desto massereicher ist es.

Allerdings sind auch andere auf der Suche nach dem göttlichen Teilchen: zum Beispiel am Konkurrenzbeschleuniger Tevatron am Fermi National Accelerator Laboratory nahe Chicago, der bislang den Spitzenplatz unter den Teilchenbeschleunigern einnimmt. Eine nicht auszudenkende Niederlage für das LHC-Team, würde man dort zuerst auf das heiß begehrte Higgs-Teilchen oder Spuren davon stoßen. Denn es zu finden, wäre gleichzeitig eine enorme Bestätigung für die Korrektheit des Standardmodells als Plan der subatomaren Welt.

Ein alternatives Modell bietet die Stringtheorie, die Elementarteilchen nicht länger als punktförmige Objekte beschreibt, sondern als schwingende Fädchen *(strings)*. Zwar gilt sie als heißer Kandidat für eine »Theorie von Allem«, doch funktioniert sie nur, wenn neben den uns wohl bekannten noch bislang unbemerkte Dimensionen existieren. Und darin liegt einer ihrer großen Makel: Diese zusätzlichen Dimensionen sind viel zu klein, um sie mit heutigen Mitteln zu beobachten. Allerdings glauben einige Physiker, dass sich ihre subtilen Auswirkungen auf unsere Welt möglicherweise im LHC bemerkbar machen.

Selbst wenn sich keine der bislang nur hypothetischen Partikel und Theorien nachweisen lassen, können die Physiker den bereits bekannten Teilchenzoo im LHC genauer untersuchen. Um sich ja nichts entgehen zu lassen, bauten sie sechs gigantische Detektoren um die Kollisionsstellen, die alle Teilchenspuren aufzeichnen. Ungefähr dreißig Millionen Mal pro Sekunde werden sich die Protonenpakete durchdringen. Und obwohl jeweils 200 Milliarden Wasserstoffkerne aufeinanderprasseln, kommt es nur rund zwanzigmal zum Crash.

Von diesen Ereignissen sind auch längst nicht alle spannend – nur etwa 100 Kollisionen pro Sekunde werden interessante Ergebnisse liefern, schätzen die Wissenschaftler. Dennoch würde die angehäufte Datenmenge auf CD gebrannt pro Jahr einen zwanzig Kilometer hohen Stapel ergeben. Aus diesem Grund speichern sie die Informationen nicht mehr zentral, sondern verteilen sie mit Hilfe eines neuartigen Computernetzwerks über die gesamte Welt. Tausende von Wissenschaftlern machen sich dann daran, die Datenflut zu analysieren.

Obskure Verschwörungstheorien

Bei all dem Enthusiasmus, den die Betreiber beim Gedanken an den LHC versprühen, rufen solch enorme Energiekonzentrationen auch Kritiker auf den Plan. Besonders die Erzeugung alles verschlingender Schwarzer Löcher oder hypothetische, die Erde zerstörende Teilchen grassierten durch die Medien und sorgten für Aufruhr. Diese Theorien lassen die Verantwortlichen natürlich nicht auf sich sitzen und legten entsprechende Gegengutachten vor. Diese streiten zwar nicht ab, dass sich zum Beispiel Schwarze Löcher in den Kollisionen bilden können. Allerdings wären sie sehr klein und würden im Nu wieder zerstrahlen – keine Gefahr für die Menschheit also.

Außerdem, so argumentieren sie, würde seit Jahrmilliarden ständig kosmische Strahlung mit der Erde und anderen Himmelskörpern kollidieren, und das mit viel höheren Energien als im LHC. Und bislang sei nichts passiert – weder im Universum noch in anderen Teilchenbeschleunigern dieser Welt. <<

PSYCHOLOGIE

Gesichtsform der Eltern beeinflusst die Partnerwahl

Männer werden bei der Partnerwahl von den Gesichtsproportionen ihrer Mütter geprägt, Frauen von denen ihrer Väter. Zu diesem Ergebnis kommt Tamas Bereczkei zusammen mit Kollegen von der Universität Pécs in Ungarn. Als ausschlaggebend identifizierte er das Verhältnis der Nasen- zur Gesichtslänge. Die Forscher vermaßen bei insgesamt 312 Erwachsenen die Gesichter. Ausgehend von 14 Merkmalen verglichen sie diese dann mit denen der Eltern und Partner. In fast allen Fällen hatten entweder die Gesichtsproportionen des männlichen Partners Ähnlichkeit mit der des Vaters seiner Partnerin oder die der Frau mit denen der Mutter ihres Partners. Die Forscher vermuten, dass Männer wie Frauen auf der Partnersuche die Gesichtszüge der Mutter beziehungsweise des Vaters bevorzugen.

Selten gelingt es aber, dass beide mit ihrer Suchstrategie Erfolg haben – allein schon, weil das beidseitige Zusammentreffen statistisch unwahrscheinlich ist. Demzufolge kann sich meist nur Mann oder Frau durchsetzen.

Schon frühere Studien suggerierten einen Zusammenhang zwischen elterlichen Gesichtsproportionen und der Partnerwahl, dieser war aber eher vage. Tamas Bereczkei analysierte jetzt jedes der 14 Merkmale unabhängig voneinander. Neben dem Verhältnis der Nasen- zur Gesichtslänge stimmte oft auch das der Mund- zur Gesichtsbreite und das der Kinn- zur Gesichtslänge überein. (sc) <<

Bereczkei, T. et al.: Facialmetric Similarities Mediate Mate Choice: Sexual Imprinting on Opposite-Sex Parents. In: Proceedings of the Royal Society B 10.1098/rspb.2008.1021, 2008.

DenkMal

Die theoretische Physik behauptet, dass …

a) das Universum elf Dimensionen hat

b) es 1000…00 (hundert Nullen) Paralleluniversen gibt

c) uns 70 Milliarden Teilchen pro Sekunde durchdringen

d) es exakt zweimal mehr Elementarteilchen gibt als bekannt

ANTWORT: Alle Aussagen sind richtig.

ERKLÄRUNG:

Es klingt fantastisch – und doch sind es anerkannte Theorien: Das Universum hat wohl elf Dimensionen. Es gibt nicht etwa unendlich viele oder gar keine, sondern 10^{100} Paralleluniversen. Uns bombardieren 70 Milliarden Teilchen pro Sekunde und Quadratzentimeter. Und es wird prognostiziert, dass Physiker genau noch einmal so viele Elementarteilchen finden werden, wie jetzt bereits bekannt sind.

So zeigte der Mathematiker Edward Witten, dass es nur in elf Dimensionen eine große vereinheitlichte Theorie aller Materie und Kräfte – die so genannte »Theory of Everything« – geben kann. Das heißt im Klartext: Wir haben ein Problem. Denn in unserer Welt gibt es mit den drei Raumachsen sowie der Zeit insgesamt vier statt elf Dimensionen. Müssen wir uns also eingestehen, dass der Traum von einer umfassenden Theorie ausgeträumt ist? Keineswegs, sagen Stringtheoretiker und arbeiten fest daran, die restlichen sieben nachzuweisen.

Ob diese Extradimensionen klein oder groß sind und wie man sie finden kann, dazu existieren wiederum viele weitere Theorien. Auch die 10^{100} Paralleluniversen kamen erst im Laufe langjähriger Forschungen zu ihrer gigantischen Zahl. Sie ergibt sich als geschätzte Anzahl von Lösungen der derzeit bekannten Universalgleichungen der Stringtheorie. Da jede Lösung ein Universum beschreibt, geht man davon aus, dass es genauso viele Universen gibt – leider sehen wir diese alle nicht, denn wir stecken ja nur in einer: unserem Weltall.

Von dort prasseln auch jede Sekunde 70 Milliarden Teilchen pro Quadratzentimeter auf uns ein. Und es macht uns gar nichts aus, sagen Wissenschaftler. Denn es handelt sich zumeist um Neutrinos, die fast nie mit Materie wechselwirken und uns quasi nicht »bemerken«. Um ein Neutrino aufzuhalten und es einzufangen, bräuchte es eine 9,5 Billionen Kilometer dicke Bleimauer – das entspricht einem Lichtjahr. Unser Körper ist für Neutrinos gar nicht vorhanden.

Die Theorie der Supersymmetrie schließlich besagt, dass es exakt doppelt so viele Elementarteilchen geben sollte wie bislang bekannt – und nicht dreimal, viermal oder beliebig viele weitere. Alle Materieteilchen, wie etwa Neutrinos, Elektronen oder Quarks, besitzen laut der Theorie einen »supersymmetrischen« Partner.

Stimmt das, so verschwinden viele mathematische Probleme – wenn nicht, gibt es Ärger am LHC, dem großen neuen Teilchenbeschleuniger in der Schweiz. Denn einer der Hauptgründe für seinen Bau war, die supersymmetrischen Teilchen zu finden. Ein Misserfolg könnte Geldgeber zukünftig vielleicht von solchen Großprojekten Abstand nehmen lassen. <<

KLIMATOLOGIE

Moossporen enthüllen Ozongeschichte

Mit Hilfe von Moossporen möchten Klimaforscher zukünftig die Geschichte der erdumspannenden Ozonschicht rekonstruieren: Die Entwicklung dieser vor gefährlicher UV-Strahlung schützenden Hülle gilt als eine der größten Unbekannten in der Atmosphärenforschung.

Über genaue Daten zur Ozonschicht verfügt die Wissenschaft erst seit Ende der 1970er Jahre, als Satelliten sie zu messen begannen; weiteres Material gewannen sie mit Spektrofotometern, die seit etwa 1920 vom Boden aus die O_3-Mengen in der Atmosphäre ermittelten. Noch länger zurückreichende Werte sind dagegen bislang nicht vorhanden. Barry Lomax von der University of Nottingham und seine Kollegen wollen diese nun indirekt über fossile Sporen verschiedener Bärlapp-Gewächse bestimmen: Die Pflanzen lagern je nach atmosphärischem Ozongehalt unterschiedliche Konzentrationen an bestimmten Phenolen in ihren Zellwänden ein, damit die UV-B-Strahlung sie nicht schädigt.

Je schwächer die Ozonschicht ausgebildet ist und je mehr UV-B-Strahlung auf die Erdoberfläche trifft, desto mehr der phenolischen Komponenten bauen die Gewächse ein. Und da Pollen sehr lange Zeit nahezu unverändert überdauern können, lassen sich dadurch womöglich langzeitig Schwankungen der O_3-Konzentrationen nachvollziehen – bis zum Tertiär vor 55 Millionen Jahren könnten die Forscher mit dieser Methode kommen, meint Lomax.

An musealen Moossporen aus Ecuador und Grönland, die aus der Zeit zwischen 1907 und 1993 stammen, überprüften die Wissenschaftler die Tauglichkeit ihrer Methode und verglichen das Ergebnis mit realen, instrumentellen Ozonmesswerten. Tatsächlich spiegelten die grönländischen Sporen die Entwicklung der Ozonschicht über der Arktis deutlich wider. Die Phenolwerte in den tropischen Gegenstücken schwankten dagegen erwartungsgemäß kaum: Am Äquator wird normalerweise stets genügend Ozon nachgebildet, so dass die Pflanzen nicht auf unterschiedliche UV-Strahlungen reagieren müssen. (dl) <<

Lomax, B. et al.: Plant Spore Walls as a Record of Long-Term Changes in Ultraviolet-B Radiation. In: Nature Geoscience 10.1038/ngeo278, 2008.

spektrumdirekt.de premium

Weitere Informationen finden Sie unter
www.spektrumdirekt.de/info

Jetzt neu: »spektrumdirekt – Die Woche«
Im Premium-Abonnement per E-Mail direkt zu Ihnen nach Hause

Als Abonnent unseres Online-Angebotes »spektrumdirekt premium«
» haben Sie Zugriff auf das Artikel-Archiv von spektrumdirekt mit fast 20 000 Artikeln
» können Sie die 13 Online-Fachlexika auf wissenschaft-online.de mit über 200 000 Stichwörtern nutzen
« erhalten Sie die neue digitale Wochenzeitschrift »spektrumdirekt – Die Woche« als PDF-Datei auf Wunsch per E-Mail zugesendet

Sie möchten das Premiumangebot von spektrumdirekt zwei Wochen lang kostenlos und unverbindlich testen?

Dann schicken Sie einfach eine E-Mail mit Ihrem Namen und dem Betreff »Premium Schnuppern« an: aboservice@wissenschaft-online.de